文春新書
806

原発安全革命

古川和男

文藝春秋

原発安全革命

古川和男

文春新書
806
¥800

原発安全革命

これまでの原発とは原理が全く違う、きわめて安全な原発がある。しかも発電効率もずっと高い。違いは「液体燃料を使う」「トリウムを燃やす」「小型化する」の三点だ。「原発は不安、でもエネルギーは必要」というのが今の現実。ならば、これで既存の原発に置き換えようではないか。

原発安全革命

古川和男

文春新書

806

献辞

熔融塩炉基礎技術を確立した米オークリッジ国立研究所
および協力して下さった国内外の人々、
国際協力を推進して下さった故亀井貫一郎先生・
故西堀榮三郎先生その他の諸先輩、
私を育て支えて下さった恩師・友人・両親・姉弟妻息子などに、
本書を捧げます。

原発安全革命　目次

はじめに——なぜ今「原発」を見直すのか

新版を出すに至ったわけ

本書の旧版は二〇〇一年に刊行された。旧版は、きわめて安全で取り扱いが容易、発電効率がよく、しかもこれからの全世界のエネルギー需要の急速な増大にも対応できる、まったく新しい革命的な原発システム（核エネルギー発電所システム）を、初めて一般書として紹介したものである。

このたび新版を出すに至った直接のきっかけは、東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故にある。

二〇一一年三月十一日、世界観測史上四番目といわれるマグニチュード九・〇の大地震が、岩手県・宮城県を初めとする東日本一帯を襲った。福島第一原発では、炉の緊急停止には成功したものの、炉は、遅れて襲来した大津波に冷却のための電源をすべて奪われ、核燃料自体が発する

高い崩壊熱で燃料棒が熔融し、その結果、格納容器から漏れ出た大量の放射性物質が、周辺地域を汚染、本書執筆の時点で今なお、危機的状況が続いている。この経緯は、すでに読者の皆さんもよくご存じのことだろう。

本書で提案・解説する新しい原発（「トリウム熔融塩炉」というう炉を中心としたシステム）であれば、原理的にこんな過酷な事故は起こりえない。

おりしも、この数年、この革命的な原発への関心が世界的に高まりつつあり、国際協力の進展で実現への道のりが見え始めた。

本書を改訂し、新版を世に問うゆえんである。

「トリウム熔融塩炉」などというと、一般の方々は、なにやらひどく難しそうなものに思われるかもしれないが、技術の原理原則はきわめて単純・簡明なものである。極力平易な記述を心がけるので、どうかその本質とするところを読み取っていただきたい。

三つのポイント

これからの原子力発電は、まずなにより安全でなければならない。安全であることで初めて、皆さんの支持を得られる。

しかし、安全であるだけでは不充分である。安全である上に、経済性がなければいけない。発電効率が良く、安価で、しかも、今後ますます増大する世界のエネルギー需要に応じられるだけ

の供給力を持っていなければいけない（それがなぜかは、第一章で詳しく説明する）。
本書の提案は、その二つのハードルをともにクリアするものである。
簡略にいえば、本書の「原発革命」の「革命」たるゆえんは、次の三点にまとめうる。
第一に、これまでの固体燃料を液体燃料に代える。事故の報道で炉心の燃料棒の図や写真をご覧になった方も多いと思うが、今の原発では、被覆管の中に密閉された固体核燃料を燃やしている。これを液体に代える。
第二に、今のウラン燃料をトリウム燃料に代える。現在の原発はウラン235の核分裂により発生する熱を利用しているが、このウラン235に代えて、それより少し質量の軽いトリウムという物質を燃料にする（ウランやトリウムについては第二章で解説する）。
第三に、原発自体を小型にする。今の原発は発電規模一〇〇万キロワット以上の大型施設が主流だが、これを二〇～三〇万キロワット程度の小型のものに代える。
この三つの変革がなぜ「革命」なのか、どういうメリットをもたらすのかについての詳しい解説は本文を読んでいただくとして、ここではごく大雑把にその意義を、安全性と経済性の両面から素描することにしよう。

潜在的な危険性

まずは、安全性から。

福島第一原発の事故以来、一般の人々の原発に向ける目は厳しくなった。あれだけの事故を起こしたのだから、世間の人々が原発の安全性に疑いの目を向けるのも当然だろう。たしかに、福島原発の事故において、危機管理意識のあまりの低さ、危機対応能力のあまりのなさなど、国や東京電力が非難されてしかるべき点が多々ある。周辺地域住民の皆さんが蒙った被害は、甚大という言葉では表せないくらい甚大で、すべての原発の安全性点検・見直しは徹底的に行なわなければならない。

が、その一方で、今稼働している原発がすべて、すぐにでもストップしなければいけないほど危険な状態にあるわけではない。安全性に最大限配慮し、緊張感を持った厳しい危機管理体制を築くことができれば、今回のような過酷な事故は防ぎえよう。

ただし、それでも潜在的な危険はある。原発の設計思想そのものに、初めから無理があるからである。

無理というのは、まず先に挙げた「固体燃料」にある。

そもそも核エネルギー炉は「化学プラント」であり、したがって燃料の形態は液体であるべきなのである。このことは核化学反応の本質に係わることで、核化学者なら誰もが同意するはずである。ところが、現実の炉の設計は、開発初期のある時点で違った選択が行なわれた。液体ではなく、固体燃料が選ばれたのである。

火力発電所は石炭や石油を燃やした熱で水を沸かし、その熱水からの水蒸気でタービンを回す

ことで発電をしているが、今の主流の軽水炉（これがどのようなものかは、本文で説明する）は、その石炭や石油を核燃料に代えたものといえる。つまり「火力発電所の原理」でつくられていて、「核エネルギー発電所の原理」には反しているのである（それなのに、なぜ固体燃料を選択し、液体燃料を選択しなかったのかについては、長い説明がいる。これも本文で詳しく解説したい）。

その結果、軽水炉においては、核燃料は被覆管に密封され、その周囲を水が循環する方式となったが、この方式では核燃料や被覆管は、核反応や放射線の影響で変質・破損・熔融して、事故原因となることが多い。また、反応により発生するガスが被覆管内部に密封され、高圧となって、管の破損時に外部にガスが噴き出す危険を生む。さらに、水は放射線で分解され、爆発の危険性のある水素を発生する。高温高圧となる水による材料の腐蝕も難問である。こうしたもろもろの不都合を抑えこむために、炉の構造は各種の安全装置やモニター機器類を装着して複雑となり、それだけ保守・点検が大変になる。悪循環である。そこに貫かれているのは「合理性をもった技術の原理」ではなく、「多重防護という無理筋対応」である（こうした不都合が極限となって重なったのが福島の事故であったのは、もうお分かりだろう）。

「化学プラント」は液体が正道なのである。核燃料が液体であれば、今述べた技術的難点のほとんどは解決できる。そして決定的に安全性が向上する。炉の構造もシンプルなものとなり、保守・点検が容易になるだけでなく、ロボットなどを利用した遠隔管理や修理作業も実現でき、作業上の被曝（ひばく）も最小限に避けられる（詳細は本文をお読みいただきたい）。

仮に東日本大震災クラスの大地震と大津波が襲ったとしても、本書で提案しているトリウム熔融塩炉であれば、充分に対処できる（熔融塩という言葉を初めて耳にする方も多かろう。本文では詳しく説明しているが、ここでは熔融塩とは固体の塩が融けて液体となったもの、塩とは我々がよく知っている食塩の仲間、といった程度に受け止めておいていただきたい）。

この炉では、核分裂連鎖反応を止めるのは容易なので（反応のコントロールが容易なのが液体燃料の大きな利点のひとつである）、通常の緊急時は、すぐに反応を止め、そのまま炉内で核燃料（正確にいうと核燃料を溶かし込んだ熔融塩）を安全に冷却することができる。大地震・大津波などの非常時には、核燃料を炉の下部から地下の冷却水プール内のタンクに落とす。そうすると、連鎖反応は自然にストップする。炉で連鎖反応が起こるのは、そこに中性子を減速させる黒鉛があるからで、核燃料が冷却水プールに落ちれば、燃料のまわりに黒鉛がなくなり、したがって中性子も減速されず、臨界が起こらないのである（難しい話とお感じの方もおられるかもしれないが、本文中で、臨界とは何か、中性子とは何か、減速とは何かを、極力分かりやすく解説しているので、そこを参照していただきたい）。

核燃料熔融塩は、連鎖反応が終わったあとも崩壊熱を出すが（ご存知のように、この崩壊熱で福島原発は大変な辛苦を味わっているのであるが）、地下に落ち、冷却水（ホウ酸水）で急速に冷やされると安定なガラス固化体になり、後は自然に冷めてゆく。「崩壊熱の暴走」を心配する必要は原理的にないのである。

万一、核燃料の一部が、地下の冷却水プールではなく、なんらかの事故で炉から漏れ出たとしても、炉外に黒鉛がない以上再臨界になることはなく、空気で徐々に冷却され、ガラス固化体となるのみである。テロにあって炉が破壊されても同じことで、溢れ出た核燃料はガラスのクズ状となり、それ以上飛散することはない。炉は高温格納室と炉格納建屋（たてや）に守られており、放射性物質が漏れ出る危険性はほとんどない。核燃料は高圧ではなく常圧であり、高圧に伴う各種の危険性も回避できる。

熔融塩というのは、いわば地球のマグマみたいなものと思っていただければよい（ただし本書で取り上げた熔融塩は無色透明だが）。あるいは前述したように、（科学的振る舞いはかなり違うが）類似のものとして、「熱で溶け液状になった食塩」を思い浮かべていただいてもよい。とても安定した液体で、放射線を浴びても変質したり破損したりせず、今述べたように冷めるとガラス状に固まり、遠く飛散して環境を汚染したりはしない。このガラスは、空気にも水にも反応しない。この熔融塩に核燃料（本書で解説するトリウム）を溶かし込んで使うのである。

核反応により発生する放射性ガスは、常時除去されていて、常に炉の中に微量しか存在していないので、漏れ出す心配をすることはない。また、今述べたように核燃料塩は水に溶けないので、燃料塩中の放射性物質が、水に溶けて外部に流出する「汚染水流出」の危険もまずない。

福島原発では大津波による「非常電源全喪失」が「崩壊熱の暴走」という大惨事を引き起こしたのであるが、この炉では万一「非常電源全喪失」が起こっても、そんな心配はいらない。炉の

下部の緊急バルブ（落下弁）が自動的に開き、燃料塩をすべて前述した地下の冷却水プール内のタンクに落とし、ガラス固化させる仕組みになっているからである。緊急バルブは、運転時は冷却して凍らせているが、冷却をやめると融けて開くので、電気は不要である。

このように、「核分裂連鎖反応を止める」「核燃料の崩壊熱を冷ます」「放射性物質を閉じ込める」というすべての面で、原理的にきわめて安全なのである。

安全面の話を別の方角からすると、燃料をトリウムとする点にある。

すでに広く知られているように、ウラン235の核分裂により、プルトニウムが生まれる。核爆弾の材料となるきわめて危険な放射性物質だが、現状では世界中がその処分に困っている。原発が稼働すればするだけ、プルトニウムの山ができる。

トリウムを燃料とすれば、プルトニウムはほとんど生まれない。それどころか、本書で提案する「トリウム熔融塩炉」でなら、プルトニウムも炉内で有効に燃やせる。プルトニウムの消滅に一役買えるのである。

トリウムは自然界に存在する物質の中でウランに次いで重いもので、中性子を吸収することで核分裂性のウラン233となる。この生成されたウラン233を「火種」にして、連鎖反応を引き起こさせるわけである。

幸いなことに、トリウムは世界中にある。埋蔵量も充分だ。ウランのように偏在していると、寡占国による政治支配を生むが、トリウムにはそんな心配はない。

しかも、核兵器への利用がとても難しい。なぜ難しいかは第六章に記したが、難しいからこそ、核冷戦時代にトリウムが不当に無視されてきたともいえる。ウランからトリウムへの変換は、ウランとプルトニウムがもたらしてきた核兵器の脅威からの解放をも意味する。

世界中にエネルギーを

今度は経済面に話を向けよう。

福島第一原発の事故があってから、「原発はすべてやめてしまおう」という声が強まっているような感じがする。あれだけの災害をもたらしたのだから、そういう声が強まるのも、ある意味、理解できなくはない。

しかし、冷静に考えていただきたい。すでに平常時で、日本の発電量の約三〇パーセントは原子力発電に支えられている。電力需要が最低となる正月に至っては、じつに九〇パーセントが原発からの電力なのである（二〇〇一年のデータ）。今年（二〇一一年）の春、東京電力が実施した計画停電ですら、市民生活はもちろん、産業界に多大な影響を及ぼしている。この現状で原発をすべて止めたら、間違いなく日本の社会は立ち行かなくなるであろう。

これからは太陽光発電や風力発電を活用すべきだ、という声もある。しかし、それらの実力たるや、とても原発と置き換わるほどのものではない。むろん、将来的にはこれらの自然エネルギーに大いに期待したい。核エネルギーに代わって、エネルギーの主役に躍り出てほしい。しかし、

よほどの技術的な大革新がなければ、当面のエネルギーとしては、間に合わないのが現実である（詳細な論議は第一章を参照されたい）。

一方で、石油・石炭などの化石燃料は、二酸化炭素排出問題や化学汚染で先行きがない。

結論として、現状の原発を最大限の注意を払って安全に運用し、次の手段を急ぎ準備するほか、現実的な手立てはないのである。

だからこそ、トリウム熔融塩炉を提案しているのである。

急いでトリウム熔融塩炉による発電システムを構築し、既存の原発と置き換えなければならない。そして、やがては自然エネルギーに主役の座を明け渡すのである。

トリウム熔融塩炉は、経済性においても既存の原発にはるかに勝っている。

固体の燃料棒は、燃焼効率の面でも不経済なのである。燃料体も被覆管も放射線により損傷を受け、変型・変質してしまうが、それらを修復したり「燃えカス」の核分裂生成物を除去したりするには、一旦燃料棒を取り出し、溶解抽出などの化学処理を加える必要がある。燃料は反応が進むにつれ劣化してゆくので、半分しか燃えていないのに一、二年ごとに燃料棒を引き出し、位置換えや交換をしなければいけない。そもそも本来の出力からすると、多量な余分量の燃料を運転前に装荷しなければいけない。こうしたさまざまな理由から、必然的に反応効率は悪いのである（それでも固体燃料の現方式が普及したのは、液体燃料より効率が悪くとも、石油などに比べれば、桁違いのエネルギーが得られるからである。核燃料の消費量は、発生熱量あたりで化石燃料の一〇〇

万分の一に過ぎない)。

トリウム熔融塩炉では、炉が寿命を迎えるときまで燃料は全く取り替えず、トリウムなどを追加するのみで、初めに装荷した火種のウラン233の約五倍量を、連続的に核分裂させ燃焼させることができる。燃焼率は五〇〇パーセントといってよい(固体燃料炉では、核燃料を装荷してから取り出すまでの一回の燃焼率は数十パーセントに過ぎない)。

固体燃料体の製作・検査・輸送・燃焼・化学処理・再製作などの作業量は膨大だが、トリウム熔融塩ではそれらを大幅に簡略化できることも、経済性の改善に大きく寄与する。

需要に応じて出力を変える(これを負荷追随という)という点で、トリウム熔融塩炉は非常に使いやすい。現状の原発は、負荷に対応して出力を変えると、固体燃料内部の温度分布が激しく変化し、それによって材質が劣化して燃料の耐久寿命が短くなる。

それで今の原発は、負荷追随させたくなく、また、早い再起動が困難だから極力止めたくなく、投下資本が高額で低出力では利子が高くなるから、なるべく全力運転を続けたいがために、もっぱらベースロード(基本の負荷を請け負う)発電所として使われているのである。先ほど述べた、正月の電力の九〇パーセントが原発から、といった現象は、こうした事情に由来する。つまり、柔軟性に欠けた、あまり使い勝手のよいものではないのである。

本来、送電ロスを考えれば、発電所は需要地の近くに置くべきものなのだが、安全性を地域住民に納得してもらう困難、高額な資本の投下などから、今の原発は都市を遠く離れた僻地に、大

型施設として集中して造られているのである。
トリウム熔融塩炉は小型にする。そうすれば、需要地である都市や工業地域の近郊に設置でき、送電ロスを大幅に減らせる。需要地ごとに分散するには小型であるほうが便利である。安全性の面でも納得してもらえる。構造・運転保守が単純で、大型化の利益がない。
そしてなにより、小型化することで、全世界へのエネルギー供給に寄与できるのである。今、エネルギーを切実に必要としているのは、多くの発展途上国である。加えて、世界の人口は爆発的に増加している。今後、人類が必要とするであろうエネルギー量は、現在の比ではないと予想される。しかし、先進国はともかく、他のほとんどの国では、大型の原発は割高で、多数の小型炉を必要としている。その需要に、小型のトリウム熔融塩炉は応え得るのである。
ただし、前提がある。そうしたトリウム熔融塩炉の世界展開には、現状では決定的に不足しているものがある。燃料の「火種」を作る中性子が足らないのだ。われわれはこの中性子不足を解決すべく、核燃料の「増殖」を計画している。
「はじめに」にしては、ちょっと小難しい話に入り過ぎたかもしれない。このあたりの話は本文でじっくり語ることにしよう。

今こそ新しい原発を

このトリウム熔融塩炉構想は、なにも私の独創ではない。一九六〇、七〇年代におけるアメリ

カ・オークリッジ国立研究所での実証的研究を初め、先人たちの膨大な研究の積み重ねがあって生まれたものである。この経緯の詳細は第五章で触れるが、一点だけはここに記しておきたい。オークリッジ研での基礎研究開発が、驚くほどわずかな資金と人員で整えられたことである。いかにこの原理が単純で優れているかの証拠である。

しかし、残念なことに、東西核冷戦下、不当にも無視され、忘れ去られ、今に至っている。

これだけ利点の多い構想が忘れ去られたという事実に、構想自体になんらかの大きな欠点・不備があるのでは、と不審を抱かれる読者も多いことだろう。そうした不審を解くために、「受け入れられずに来た理由」を第九章で解説した。詳しくはそこを読んでいただきたいが、ここでは、原理的に正しい技術も、人間社会のさまざまな動きの中で、ときに不当な扱いをうけることがある、という事実のみを記しておきたい。

トリウム熔融塩炉は、ここ数年、米・仏・露・チェコ・トルコ・ベネズエラ・オーストラリア等々世界各国から、一緒に実験炉を造ろう、といった呼びかけを初め、さまざまな協力要請が届いている。原子力の平和利用に、どの国も行きづまっている。

今からでも遅くない。今こそ発想を転換し、新しい原発を造るときだ。二一世紀の人類のために——。

序章　打開への道筋

わが国が直面している深刻なエネルギー問題を
さまざまな角度から分析しつつ、
当面は核化学エネルギー利用にしか
打開の道がないことを明らかにする。

これでは日本は孤立する

福島原発事故以後、原発への忌避とともに、わが国のエネルギー事情について、次のような安易な考えが拡がっているようにみえる。

「石油を初めとした化石燃料の使用には地球温暖化やその資源枯渇の問題があるといわれるが、まだ実害をもたらすほど深刻化はしていないし、それへの反論もだんだん出てきているようだ。しばらくは現状のままでも何とかやり過ごせるのではないか。それに、次第に風力・太陽光発電が普及して、エネルギーの主役になりそうだ。そうなれば温暖化問題も解決するに違いないし、安全性に不安がある原発も、すべて廃棄できるのではないか。また、日本では人口も減少に転じるし、ますます世の中の省エネは進むだろうから、そもそもエネルギー消費量自体が減るだろう。とすれば、当面石油不足に悩むこともあるまい。石油高騰につられて、天然ガスも増産されているそうだし……」

だが、本当にそうなのだろうか。

わが国の一次エネルギーの自給率は、わずか四パーセントである。変な理屈ではあるが、敢えて原子力を自前として加えても、一八パーセントに過ぎないのである。一次エネルギーの半分は石油であり、さらに、その八六パーセントは中東に依存している。石油の国家備蓄は一一三日分に過ぎない。このようにエネルギーの海外依存度が異例に高いだけでなく、貿易依存・食糧確保・安全保障などすべての面で、わが国は孤立しては生きてゆけない現状にある。

そうした中、核冷戦終結で世界は大きく変動している。世界人口は一九五〇年に二五億人だったものが、一九九〇年に五〇億人、二〇〇〇年に六一・六億人と、毎年一億人以上の爆発的増加を続けており、二〇五〇年には一〇〇億人となる趨勢である。

特にアジアの急速な経済発展は、今後の世界のエネルギー事情に大きな影響をあたえている。世界人口の三分の一を占める中国・インドを中心としたアジア諸国のエネルギー需要は、二〇年で倍増すると考えられる。しかも中国は、環境保全上から「脱石炭」を進めており、石油・天然ガス需要は、世界一となるであろう。後述するように、今後は日本も、もっと天然ガスへの依存を強めなければならないが、その入手対応は先進国の中で大きく遅れをとっている。こうしたもろもろの情況は、安定したエネルギー源を確保したい日本にとって大変な脅威である。

地球環境破壊

一方、こうした情勢変化と並行して地球環境破壊が進み、化石燃料自体の使用制限が重圧となりつつある。

化石燃料の使用により大気中に放出される二酸化炭素（CO_2）などが、太陽光で暖められた地面から熱放射される赤外線を吸収するブランケット効果をもたらして、宇宙空間への熱放散量を減らし、次第に大気温度を上昇させる——これが「温室効果」だが、化石燃料使用に起因する化学的ないし微粒子汚染も、地球環境に諸変化を引き起こす。大都会が集中的に利用熱を放出する

ヒート・アイランド現象による局所的異常気象の多発、ハリケーン・竜巻・局所豪雨の巨大化傾向なども年々強まっているとの実感がある。

二〇〇一年、世界の環境学者を総動員した「気候変動に関する政府間パネル」（ＩＰＣＣ）は、今世紀末には最大五・八度の平均気温上昇および八八センチの海面上昇の可能性があると発表した。現に刻々と海面は上昇しつつあり、有効な対策がなされなければ、海抜一メートルの島国キリバスなどは数十年以内に確実に生存不能となるという。オランダは水没防止に、まず国土面積の三パーセントに空の人造湖や地下空所を造る決意だという。オランダはそれもできようが、バングラデシュやエジプトのデルタ地帯などでは、数千万人の住居が奪われると見られている。日本でも五〇センチの海面上昇により二九〇万人が移住を余儀なくされる、という報告がある。

気温変化の影響はもっと急速かつ致命的で、旱魃（かんばつ）その他を介しつつ農業生産を破壊するのではないか、と警告する研究者もいる。今すでに栄養失調状態の人は一〇億人で、また飲料水不足の人も一〇億人という。こうした農業の破壊がもたらす惨禍は、計りしれないものとなろう。

「国連ミレニアム計画」でも、日に一ドル未満で生きている人が一一億人、一〜二ドルの人が一六億人で、その貧困救済に「先進国は国民総生産（ＧＤＰ）の〇・七パーセントを政府開発援助（ＯＤＡ）として拠出すべし」と要請しているが、実行しているのはスウェーデンなど数カ国のみで、日本さえも〇・二パーセントに過ぎない。

二〇〇七年のＩＰＣＣ報告では、温度上昇を二度以内に抑えるべきだが、それには二〇五〇年

における温室効果ガスの世界排出量を半減させるべきで、先進国は八〇パーセント削減が求められると結論している。これは誰が見ても実現不可能であろう。
加えて、IPCCが情報操作を行なったという暴露（二〇〇九年のクライメートゲート事件）までが出来し、「温暖化どころか、これから地球寒冷期へ移行することこそが心配だ」といった反論さえ強まってきている。この先進国と発展途上国の利害調整はさらに困難を増し、人類の未来を暗くしている。表面的・短期的な数量改善策だけではなく、少なくとも一〇〇年先までを見通し、実効性をもった合理的新エネルギー技術の開発が緊急に必要である。

手をこまねくだけの日本

では、日本自体の取り組みはどうか。
一九九七年末、日本政府主導で世界環境京都会議（COP3）を開催し、難航しつつも、日本も二〇一〇年頃には一九九〇年に比べて、地球温暖化ガスの年間放出量を六パーセント減らすと約束した。ところが、一九九〇年から現在まで、減らすどころか、平成不況といわれる低成長下であるにもかかわらず、逆に数パーセントも増やしてしまった。約束を守るために、二〇五〇年には温暖化ガスを八〇パーセント減らしてみせる、などといった、ある首脳の暴言まで公表される始末であった。その発言は撤回されたようであるが、政府は有効な対策も打ち出せず、手をこまねくばかりとしか見えない。

一方で、東日本大震災後、東京電力などでは電力供給が逼迫（ひっぱく）しているが、かつてはこんな時期もあった。

二〇〇一年三月、日本の電力施設の三分の一をかかえる東京電力が、建設ないし計画中の一二の発電所（原発を含む）の完成期を三～五年繰り延べると発表した。その十数年前の経済バブル期の、年率六パーセントという電力需要の増加に応じ、原発を含む最新鋭発電所を準備した結果、それらが近年稼働を始めたが、バブル崩壊後、需要増加が年率一パーセントに落ち、家電製品の省エネルギー化、電力自由化による自家発電やガス冷房の普及が進んで、当面の電力に余裕が生れた、ということのようであった。

需要の伸びの鈍化自体は歓迎すべきことだろう。省エネは必要だし、今後さらに進める努力をすべきである。しかし、その効果には限界がある。温暖化ガス排出の現状を見てもわかるように、現実問題として、産業を振興しつつ電力需要を減らすのは容易ではない。右の現状も「伸びが鈍化」しているのであって、減少しているわけではないのである。減少には多大な痛みが伴なう。

事実、東日本大震災後の東京電力による計画停電は、一般市民生活にはもちろん、産業界にも大きな打撃を与えた。節電は少々の痛みではないのである。

電力が逼迫する中、産業界を停滞させるわけにもいかず、また、いつまでも市民生活を犠牲にするわけにもいかず、かといって、電力供給量を増やすための新規発電所の建設には、多くの障壁が待ち受けている。

ともあれ、今、緊急に求められているのは、エネルギー政策の根本的な見直しである。問題は日本経済の再建や温暖化防止のみではない。さまざまなかたちの環境汚染が、現在の化石燃料依存の社会構造から発生している。それのみか、世界のほとんどすべての社会・産業・政治構造自体が、化石燃料を基軸にしているがゆえにゆがみ、行きづまりを見せている。人口問題・貧困飢餓・砂漠化・水不足に始まり、核兵器廃絶の戦略問題まで、これと無関係ではなかろう。

さて、打開策として一般にいわれるのは、「クリーンなエネルギーを使え。ライフスタイルを変えよ」である。では、それは実現可能なのだろうか。

回避策はあるのか

太陽光・太陽熱・風力・波力・潮力・海水温度差などの再生型太陽エネルギーを大いに利用したいというのは、多くの人の素直な思いだろう。人類が現在使用している総エネルギーの約一万倍のエネルギーが太陽から降り注いでおり、最終的に熱となって地球を暖めているが、それらが常温の熱になる前にその一部を有効な電力などに変換利用することができれば、地球環境はほとんど何の変化も受けないですむからである。

私も、できるものなら一刻も早く地球保全に最適な再生型太陽エネルギー技術の本格的な成熟を願っているが、それには今後どうしても四、五〇年は必要である（第一章参照）。現在程度の

技術では、安定的に強風が吹き、安定的に日照に恵まれる自然条件の良い国でも、全電力の二、三〇パーセント以上を支えるのは困難である。現状は税金で支え、基幹電力に寄生しているのであって、これでは肝心の基幹電力事業が不安定になってしまう恐れが多大である。

たとえば、日本では太陽光発電を推進するために、税金で設備購入の補助をし、発生した電気を電力会社が高く買い上げている。税金補助を止めると、とたんに普及は停まる始末である。

つまり、当面は経済性を問わない特殊目的や補助的な利用には活かせるが、安易に依存すると社会経済を致命的に破壊し、健全なエネルギー・環境政策を遂行する活力を失わせてしまう危険性がある。衝撃を与えた米国カリフォルニア州の電力騒動（二〇〇一年、電力自由化に起因する電力供給不足で大停電が発生した事件。自然エネルギーを利用した発電所の乱立で電力価格が高騰した）はこれと無関係ではない。

「太陽エネルギー先進国」といわれるドイツなどでも、明らかに支えているのは国税である。まして自然条件の悪い国々や発展途上国では、膨大な資金調達をふくめ、無力である。「貧乏人は死ね」というのか、という声が高まるばかりである。

水素は二次エネルギー

水素ガスは燃えれば水になるだけだから、まさにクリーンである。したがって、これがよく真の救世主のように喧伝（けんでん）されている。しかし、水素ガスは実は、現状では「化石燃料そのもの」な

のである。地上や地中は酸素が支配している世界だから、水素は単独では存在せず、酸素と結合して安定な水や岩石や生物などの一部となっている。したがって、我々が自然から直接水素を入手することは不可能なのである。つまり、何らかの莫大なエネルギーを使っての化学還元操作で、たとえば電力で水を電気分解したり、メタン（天然ガスの主成分、CH_4）と水（H_2O）を高温で加熱反応させたりして、入手せざるをえない。莫大な量の一次エネルギーを消費しなければ、水素は決して得られないのである。

すなわち水素を利用する際の一番の問題は、水素の生産に必要な一次エネルギーをいかに入手するかにある。二酸化炭素を放出させないためには、その一次エネルギーは、核エネルギーか太陽エネルギーに求めざるをえない。

核エネルギー利用の可能性

化石燃料は使えない、太陽エネルギーは間に合わないとすれば、残るは「核エネルギーを利用する原発」である。しかし、これまで世界を見渡しても一般に、これへの取り組みは及び腰だった。福島原発事故により、さらに及び腰になるのは必定であろう。これまで全く低調であった欧米で近年、「やはり原発は造らざるを得ない」という世論が強まりつつあったが、この事故でそれも大転換の兆しである。

日本政府もかつて、京都会議の約束を果たすために、二〇一〇年までに新規二〇基の原発を建

設すると発表したが、その後各界の批判に屈して一三基に減らし、また最近は二〇三〇年までに一四基は必要と言っていたようであるが、中枢の人たちさえ実現を確信していなかった。今は福島原発事故により、さらにトーンダウンしているのではなかろうか。

日本だけではない。具体的な環境対策として、しっかりした核エネルギー政策をもつ国はあるのだろうか。最も責任をもつべきOECD（経済協力開発機構）でさえ、現在は策なしではなかろうか。その最も強気な核エネルギー開発の提案は、二一世紀中頃に今の三倍の発電量にしたい、というものだった。また、一九九七年のIAEA（国際原子力機関）の予測では、表0－1（左頁）に示したように、二〇一五年には設備容量ではアジアを中心に七パーセント増加する可能性があるが、総発電量に対する原発発電総量は三〇パーセントも低下するという。後述するように、二一世紀を見通したとき、核エネルギーへの需要は膨大となる。それなのに、この程度の認識ないし意欲しかないのなら、いっそ廃止政策を鮮明にしたほうがよほど世のためである。

一方で近年、世界の三分の一の人口を占めるアジアの新興諸国が、壮大な「原発建設拡大策」を打ち出してきている。二〇五〇年までに四〇〇基くらいが造られる、などと話題になっているが、「虚構」である。今は、安い労働力を頼りに「建設可能」と言っているが、それもそのうちなくなるのみでなく、後で記すように「今買う原発」に未来はないのである。先進国がほぼすべて手を引かざるを得ない「解決困難な課題」が山積だからである。しかし、アジアの新興諸国政府は、経済成長により爆発する大衆の電力希求に応えるために、虚構でも「原発建設政策」を掲

表0-1　IAEAが予測する2015年の核エネルギー設備容量(1997)

	1996年	2015年	増減比率
核エネルギー発電所の総設備容量	3.5億kWe	3.75億kWe	+7%
世界総発電量に対する比率	17%	12%	−30%

kWeはキロワット（eは発電量を表わす）

げざるをえないだけの話である。製造引き受け手の先進国は、全く無責任にも「彼らの持て余した技術資金を消化し、雇用を増やすため」、未来保証のない商品を売ろうとしている。今回の福島原発事故は、一斉にその虚構の暴露に作用し始めている。

なお、「はじめに」でも記したが、「未来がない」とはいえ、現存の原発がすべて危険であり、即刻廃止せよなどといっているのではない。現に、すでに世界の電力の一六パーセントは原発が供給している。これをおいそれと止めるわけにはゆかない。しかし、安易な擁護論はもう限界である。

今回の事故により、原発運転従業者の「志気低下」が一層加速するのが心配である。彼らにしっかり「今を護ってもらう」ためにも、今、われわれが尽くさなければならないのは、「次のより良い安全な原発」を生むための努力である。

改めて、世界全般で原発利用の気運が後退している主因は、要約すると、

（一）多重な安全性強化が必要で、コスト増とも関連して経済競争力が低下してきたこと、

（二）放射性廃棄物および使用済み核燃料の処理が難問であること、

（三）核拡散対策を含めて社会的同意形成が困難であること、

の三つである。この内容は深刻なものであって、それ自体の対策を提示するのが本書である。

日本人の意識調査（「朝日新聞」二〇〇一年元日）によると、第一、第二次石油ショックまでは原発推進派が半数以上、反対は四分の一だったが、一九八六年のチェルノブイリ事故以降は逆転し、賛成三〇パーセント台、反対四〇パーセント台となった。男性は賛否ほぼ同数だが、女性の反対は五三パーセントで賛成の二倍以上だったという。一般市民の感覚として無理からぬものがあったと思う。近年、半数が賛成に回るようになったようであるが、それは再生可能エネルギー推奨の合理性が大いに疑われてきたからである。これは自分の税金を食うものと知り、いやでも原子力のほうがましか、と思い始めたからであろう。したがって、いざとなると「私の庭」には断固拒否である。福島の事故が起こった今、こうした調査が行なわれたら、反対の回答が増加するのは間違いなかろう。

しかし、ここまで述べてきたように、二一世紀の人類は、当面は核エネルギー以外に頼れる資源はないのである。科学者たちには前記の問題点（一）～（三）を解決する新しい核エネルギー技術を創造・提案する責務がある。

ところが、良識あるはずの科学者たちが大真面目で「核科学は不要である」などと演説をする始末である。今、大学や研究所で、内心はさておき「核エネルギーは必要」と、堂々と確信をもって語る人が何人いるだろうか。信用を失墜させるような事故や失態が続発する中で一般市民が嫌うのは当然だが、今や正月休みの需要低減期には我が国の電力の九〇パーセント（通常は約三

〇パーセント）を原発が供給している社会なのである。科学者が核科学と真面目に向き合おうとしないのは、怠慢といわざるをえないのではないか。

本書の意図するところ——よい原発を求めて

先に示した原発の抱える問題点（一）～（三）を本当に解決でき、過去および現在の原発よりも「充分に良い原発」が存在するのであろうか？　その回答を用意したのが本書である。

基本に忠実であれば、はるかに安全で効率がよく、経済的かつ非軍事的な原発技術がありうる。おいおい具体的にその話を進めるが、本書で提案するのは、そうした「革命的な」新技術体系である。先回りして一言だけ解説を加えておくと、現在使用ないし開発中の原発すべてが「核分裂反応の原則に従っていない」ことは、受け入れれば決定的な安全性を導く「液体核燃料」を使っていないことからも明らかである。

また、単に原発の技術内容を改良するのみではない。今進行中の発展途上国の人口爆発・経済発展を吸収して地球を支えるには、現在の世界の原発の総能力を二、三〇倍にする必要がある（なぜかは第一章で論ずる）。事実、アジアの原発施設数は、三〇年来一直線に増大し続けている。発展途上国はみな、切実にエネルギーを必要としている。

本書で提案する新技術によれば、それに応えられる規模のものが最少限の経費と時間（約一五～二〇年以内）で実用開始され、今世紀中頃までに化石燃料を抑えこみ最強の基幹エネルギー技

術に育つ可能性がある（その後を太陽エネルギーに引き継がせるのである）。

この技術は、約六〇年前の核分裂反応利用研究の初期の段階から検討されていた。ただ、当時はまだこの新技術の長所・短所がよくわからなかった。そのうちに東西両陣営間で激烈な「核冷戦」が展開され、せっかくその真髄がわかり始めた一九七〇~九〇年は、全くの「核平和利用の暗黒時代」となり、日本でさえ我々が提案したこの「真の非軍事的核エネルギー技術」の検討を敬遠してしまった（この技術がなぜこれまで受け容れられなかったのかについては、第九章で改めて述べる）。

もちろん、この他にも現状打開のための良いアイデアは多々あるだろう。しかし時間がない。二一世紀の諸問題を解決するためには、「一〇年または二〇年以内に、世界に受け容れられ展開できる経済的な巨大新エネルギー技術」がぜひ必要なのである。本書でそれに挑戦したい。

これが、現在進行中の福島原発事故への対策の主要骨格形成に役立つのみでなく、世界の最大課題である貧困そしてテロ対策の根源的解決基盤も提供できると信じたい。

事業の性格上から国家の支援は必要であるが、我々はそれを「民間主導」で開発すべきと考えている。そうでないと「真の産業」は健全に実現できないからである。

第一章　人類とエネルギー

人類および地球環境とエネルギーとの関わりを、資源問題を含めつつ広く展望しておきたい。

有史以来のエネルギー資源

まず、過去のエネルギー技術の変遷をひと通り整理しておきたい。ここでは、若くして水素製造法で名をなしたイタリアの物理化学者で、その後国際応用システム解析研究所（ＩＩＡＳＡ）で世界のエネルギー戦略を研究したマルケッツィがまとめたものを参考にしたい。彼は「物流関数」といわれるものを使って、世界で使用された主要エネルギー資源のそれぞれが全体の中で占める割合分率（Ｆ）の歴史的変遷を示してくれた。その図１－１（左頁）を、化学工学者で社会評論家の馬野周二氏の注釈（『石油危機の幻影』『石油危機の解決』共に一九八〇年、ダイヤモンド社）を添えて示す。

なお、物流関数などというなじみのないものを使うが、これは次のようなものである。たとえば、閉じられた培養容器内のバクテリアの数は、初期のうちはなかなか増えないが、中間時点で最も急速に増大し、やがてペースダウンして徐々に飽和点に近づく。このとき、バクテリア数の飽和状態での数に対する比率（分率Ｆ）を、時間経過に従って図にプロットすると、中点の上下で対称的にねじれた曲線になる（飽和点ではＦ＝１である）。ところが、分率Ｆそのものではなく$F/(1-F)$値の対数（これを物流関数と呼ぶ）で図を描き直すと、時間に対してきれいな直線になるのである（話が難しいとお感じになるかもしれない。物流の推移をわかりやすくとらえる図、といった程度にご理解いただきたい）。この事実は一八四五年に発見された。

生物学ではよく知られていたこの物流関数が、より広く利用されるようになったのは、第二次

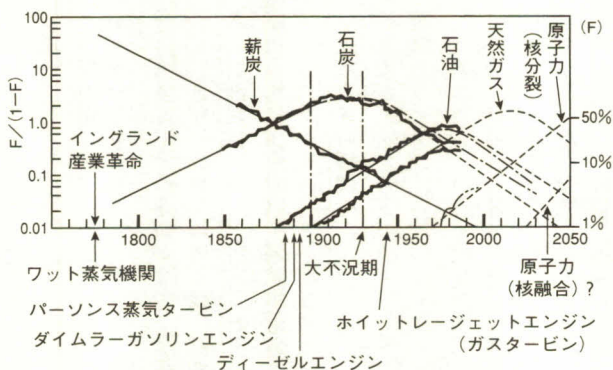



図1-1　世界における各種主要エネルギーの占有分率(F)の経年変化［マルケッツイ・馬野］

世界大戦後のことである。世の中で白熱灯が蛍光灯に置き換わる様子（社会への流通貫入）がこの関数で実によく解析できることが知られるようになったのがきっかけである。というわけで、図1－1もこの物流関数を使って描かれた。

エネルギー資源使用の統計値は、一八五〇年頃からしか存在しない。また、水力は約三パーセントを占めるが、その本質は治水ないし環境対策にあり、しかも近年ダム建設には再評価が加えられつつあり、長期的にはあまり盛衰するものではない。それで、マルケッツイは水力を論議から除外している。

図1－1の底辺は占有分率一パーセントで、ゼロではない。つまり、その下に一パーセント未満の利用期間があるわけだが、それは不安定もしくは未熟で、まだ重要でない上に変動が激しいから明示しないのである。また、三〇～五〇パーセントあたりで最も成長速度が大きくなる（実際上、五〇パーセント以上にはな

らないのが原則である。それ以上に育って独占すると、さまざまな社会的不都合が誘発され、他のより良い技術が割り込んでくるのが、人間社会の本性である)。

石炭の場合は、そのあたりが英国の産業革命の完成、ビクトリア王朝末期になる。大英帝国の歴史は石炭時代そのものだった。同じように、米国テキサス州で石油時代・自動車文明が幕をあけ、まさに石油は米国の繁栄を象徴する。事実、一九六〇年頃が米国の最盛期となる。少なくとも二〇世紀、特にその後半は、石油が世界の騒乱や戦争の最大要因となったという意味でも、まさに石油時代だった。現在、おそらく石油はピークを過ぎ、着実に天然ガスの時代に移行しつつある。ここでも日本の対応の遅れが懸念される。

天然ガスの時代へ

主役が石油から天然ガスへと移行しつつあるのは、社会がよりクリーンで経済効率の高い資源を探し求めた当然の結果である。

天然ガスがクリーンであるのは、主成分のメタン（CH_4）がガスとしてほとんど純粋に得られるからである。原油は不純で生体や金属類に対し有害な硫黄などでひどく汚染されているが、天然ガスは比較にならないほど汚染がわずかである。また、水素分をより多く含むのも利点である。なぜなら、水素は燃えても水になるだけで無害だからである。また、海底や地中のメタン・ハイドレート（氷にくるまれたメタン）を含め確認埋蔵量も充分であり、二一世紀の前半はこれなし

には人類は生存不可能だろう。最近、原油価格の高騰が続く中、次第に今まで高すぎて使われなかったシェールガスなどが多量に使われ始めたのは、全体として良いことである。よりクリーンだからである。海底のメタン・ハイドレートなども同様である。

しかし、弱点もある。ひとつは軽いガスであり、すぐ放散し爆発の危険性があることである。今ひとつは、大気中に放出されたこのガスの温室効果である。これは二酸化炭素より分子当たり二一倍強い（ＩＰＣＣの評価）。したがって、採掘・輸送・使用に当たって、充分管理された高度かつ大規模な技術が用意されなければならない。現実的には当面、石炭・石油・天然ガスが各長所を生かしつつ共存せざるをえない。

なお、ここで少し補足すると、各種の資源の中で薪の類は、水素分がかなり多く純粋な炭水化物だから、燃やしてもほとんどは水と二酸化炭素になる。植物は空気中の二酸化炭素を吸収するので、植林などで植物資源を増やし、そこから薪をバイオマス・エネルギーとしてある程度復活させることには、温暖化対策・緑化環境対策上からも合理性がある。

地下資源は有限か無限か

「化石燃料はまだ充分に埋蔵されている」という意見もあれば、「そのうちなくなる」という意見もある。最近も、「まだある」という主張に対し、「日本経済新聞」紙上で「石油が二〇年でなくならないとどうして言える？」と、反論をしていた専門家がいた。たしかに簡単には否定でき

ない。だれもよく知らないからである。資源論などはほとんど商取引の問題と理解すべきである。売買のための探査だから、三〇〜四〇年分見つかったらそれで充分、それ以上見つけては値崩れさせるだけの話であり、実は存在しては困るのである。これ以上の多言を要しないだろうが、ある種の専門家は営利上「すぐなくなる」と信じさせたいのである。

また、資源保有量は国家の最高度の機密事項として決して真相は語られない、という面も承知すべきだろう。我々は、足元の地中一〇センチ以下につき具体的には何も知らないのが通例である。

以上を承知の上での私の主張は「あらゆる資源は実効的に無限」というものである。過去になくなってしまった資源はひとつもなく、時とともに単価は下がり続けている。これには主役の資源が次々に交代することも関係している。間違っても「資源はなくなるから、高価な技術もそのうち使わざるをえない」などと言ってはならない。

私の人生の中でも多くの実例を経験したが、一、二の例だけを示そう。

「フッ素」は私もこれから大いに使いたい資源だが（なぜであるかは第五章で触れる）、第二次世界大戦中には屈指の希少戦略物資だった。航空機用アルミニウムの熔融塩電解精錬に必須だったが、日本では朝鮮半島北端の白頭山からしか得られなかった。しかし、今では煤煙などからいくらでも得られる。「金（きん）」は人類が最も珍重していて、たいていの教科書に埋蔵量は二〇年分と書かれているが、すでに二〇年の何倍もの時が経った。「金」が枯渇しないことを信じたくなけれ

ば、買い占めにかかるがよい。

なお、私が敢えて「実効的」というのは、地球化学的にはもちろん有限だからである。いうまでもなく、資源によって入手の困難度はいろいろであり、価格にも大きな開きがある。また、地域差による制約や緊急な多量入手の時間的困難などもある。しかし、それでも「無限」と考えるほうが「有限」と考えるより、はるかに正当無難だろう。

「あらゆる資源は実効的に無限」と考えておいて、少なくとも今後一〇〇年は全く不都合はない。このことはきわめて重要である。現存のエネルギー政策のほとんどは「有限」説に基づいて仕組まれ、「有限」を否定するものは異端と思われてきた。「石油がなくなるから原発は必要だ」などという人もいるが、与（くみ）したくない。こうした虚構の「有限」説の横行が、本物のエネルギー論議を乱す最たるものであったのかもしれない（いうまでもないが、資源があるからといって浪費を奨めているわけではない。浪費をすれば、廃棄物の処分に苦しむのは自明である）。

なお、地殻から人類が採取できる地下資源量の上限を、「地下一キロメートルまでに存在する元素総量の一万分の一」とする考え（米国地質調査所）があった。この値は地球化学的に充分な精度で計算できるが、金で約五〇万トン、ウランで約三億トン、トリウム（この資源の重要性は後述）で約一〇億トンということになる。いろいろと考えさせられる数字である。

有限説が一般に好まれる理由として思いあたるのは、「環境の有限性」である。環境にもいろいろあるが、特に脆弱（ぜいじゃく）なのは大気だろう。大気は重量にして地表面一平方センチ当たり一キログ

ラムしかなく、きわめてわずかな量である。大気は相対的にきわめて汚れ壊れやすく、その意味で有限である。これが暗示となって、天然資源一般も実効的に有限と考えたくなるのだろう。ところが地下には、一キロメートルまでの深さに大気に比べて三〇〇倍、一〇キロメートルまでに三〇〇〇倍の資源物質が存在する。

再び物流関数による未来予測

再び未来予測に物流関数を使いたい。すでにマルケッツィの仕事は図1-1で過去のエネルギー事情を中心に紹介したが、これをさらに二二世紀にまで延伸させてみよう。その際、前提とする仮説は、

(一) 過去の例に学んで主要基幹エネルギー技術の主役時代はほぼ一〇〇年、全体でも約二〇〇年で寿命を終了する、

(二) 今後その任務を担うのは、まず天然ガス、核分裂エネルギー、次いで再生型太陽エネルギーである、

という二つである。

結果を図1-2(A)に示した(45頁)。天然ガスの利用強化については、すでに論じたように、疑問の余地はないだろう。メタン・ハイドレート利用も成功させつつ、この図のように支えてゆかざるをえない。再生型太陽エネルギーの実用化の開始時期(全エネルギーの一パーセント

になる時点）については、まだ我々は何も知らない。できるだけこの図のように二〇二五年あたりに実現発足させて、二一世紀末の本格利用に間に合わせたい、そして核分裂エネルギーを世紀末には完全な後退期に入らせたい、という意図からこの図は描かれている。

核分裂エネルギーの立ち上り線は、過去のように国家政策の都合で決められるのではなく、今後はより単純純粋に民間産業の力で直線的に健全に成長してほしい。ただし、直線といってもそれは物流関数を表示する上で、であり、エネルギー量の予測には、相対値（割合分率）Fではなく、その絶対値を知らなければならない。

それには、まず世界の「一次エネルギー消費全体の将来予測値」が必要である。この全体値に対する分担分率として、各種エネルギー消費量の割合（F）が割り振られるからである。

世界全体の消費量予測自体もまた大変な難問である。過去の実績をマルケッツイの協力者が整理したものを、図1－2（B）に示した。これは粗く見て対数値的に増加しており、毎年の増加率は約二・三パーセントである。これをそのまま延長して二一世紀の予測値としよう。

この二・三パーセントの値の選択は自明、というのでは決してない。しかし、これより大きい成長率は環境対策上からも好ましくない。先進諸国では、安易なエネルギー消費への反省が始まっている。利用効率の向上などの技術改良の他に、社会文明思想からの反省で政策的に省エネルギーに努め、減らす余地もあろう。

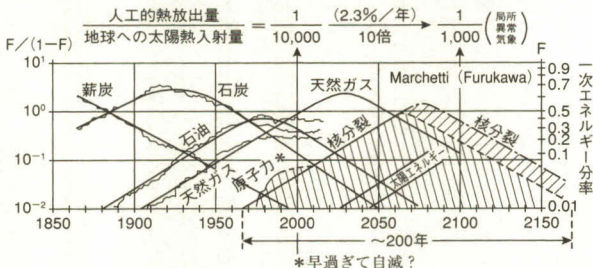
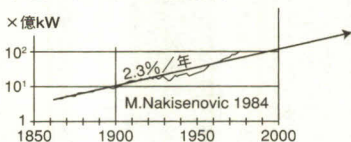
しかしまた、二・三パーセントより低くできるとも考えにくい。少なくとも二一世紀前半には、

開発途上国の人口爆発・生活向上によりエネルギー消費の急速な増大は避けられそうにない。これらを加味しつつ、願望をこめて二・三パーセントを選んだのである。

この年率二・三パーセントの複利的な増大は、約三〇年後ごとに二倍、一〇〇年後にはちょうど一〇倍になることを意味する。小さなものではない。

なお、図1-2（A）で、種々の一次エネルギーの分率曲線の実績値が最近は皆水平に近くなり、マルケッツィの予測に従わない傾向がある。実績値の公表がかなり遅れるために最近までの動向はよくわからないが、私はこれは、最近の「市場経済」が本質的に混乱しているための一時的傾向とみている。また、原子力の曲線が不当（？）にも水平となっていて健全に発展できないことにも引きずられているといえそうであるが、私は「本質的に市場原理（良い技術は経済的であるということ）が機能せず、政策操作（政治工作が市場を支配すること）が優先」している現代病の結果と考えている。社会科学者たちは誰もこの問題に答えてくれないが。

「発熱型エネルギー」技術の限界

これまで話題にしてきた基幹エネルギー技術は、すべて地中に眠る化石燃料及び核燃料を燃やし、人為的に熱エネルギーに変えつつ利用するものである。これらを「発熱型エネルギー」と呼ぶことにしよう。その熱量が大気や地表を暖め、気温を高める。また化石燃料の場合には、前述のように温室効果による地球温度の急速な上昇が心配される。膨大な化学物質の取り扱いに伴う

未来も2.3%／年と仮定。人口爆発を忘れてはならない。この仮定により、100年後には人工熱放出が10倍となり、局所異常気象が心配。したがって22世紀は太陽エネルギーの時代？

(A)(D)斜線部のような核分裂発電を実現しても、(C)のように化石燃料によりCO_2は増大を続ける。

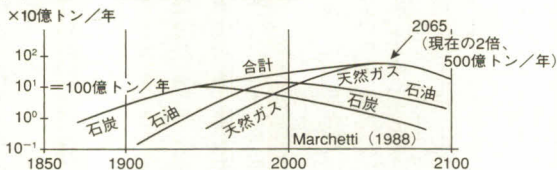
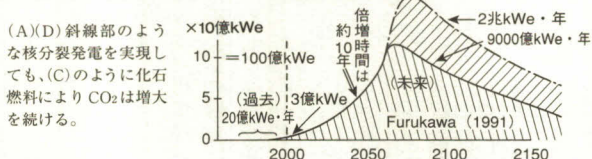



図1-2　21世紀に必要な核分裂エネルギー産業の規模予測

地球環境の化学汚染も無視できない。したがって、今こそ核エネルギー利用を推進しようと提案しているのだが、その論議に入る前に、これら発熱型エネルギー一般の将来性について考えておきたい。核エネルギー利用の全体像を捉える際に、欠くことのできない論点だからである。

現在、世界の人口分布はきわめて不均衡で、諸所の狭い地域に集中している上に、大都市居住願望でその傾向は加速されつつある。そして、地上におけるエネルギー使用分布、すなわち熱発生分布は局在する人口分布とほぼ一致する。その結果現れるヒート・アイランド現象が、局所異常気象の出現頻度・強度を増大させていると考えられている。それに基づく天災の強大化は、今後数年内に耐えられないものとなるだろう。現に建造物に対する毎秒五〇メートルの耐風速規制は、七五メートルにすべきだとの意見が強まっているそうである。人類のエネルギー使用量は三〇年ごと二倍に増大しているが、局所的にはもっと激しい増加が起きている。

一〇〇年後には平均的に、人類の使用エネルギー量は現在の約一〇倍となる。これは図1-2(A)の上部に示したように、地球への太陽熱入射総量の「一〇〇〇分の一」を占めることを意味する。現在の「一万分の一」の時代でさえ異変が起きつつあるのだから、二一世紀後期には、発熱型エネルギーはみな主役の座を降りてもらわなければならない。もちろん、これには核エネルギー全般も含まれる。代わって、今世紀末までには非発熱型の再生型太陽エネルギーが主役になってもらわなければならない。ただし、さまざまなエネルギー技術が完全に消えるのではなく、部分的住み分けが行なわれるだろう。

なお、太陽エネルギー技術でも、宇宙すなわち人工衛星や月などでの発電とその地球移入であれば、やはり問題である。人類の使用エネルギーの何割かを占める大規模な導入は、地球環境を乱す追加熱量であり、発熱型エネルギーと同格となるからである。核融合を利用した宇宙発電なども同様で、おそらく受け容れられないだろう。また、少量であれば無価値である。

少し強く断定したが、このような考察・思考実験を一度行なっておくのは、世界のエネルギー戦略の包括的な整理に有用と考える。特に、核分裂エネルギーも二一世紀後期に後退縮小を始めるのは、廃棄物消滅対策上、きわめて重要かつ有効である。このことは第八章の終り近くで取り上げる。

実は、我々にとりもっぱら関心のある年代は、せいぜい二〇七〇～八〇年頃までである。それより先の時代の予測精度はかなり低くなるが、論議の本質は崩れないだろうから、自信をもって本論の核分裂エネルギー利用の予測論議に戻ろう。

図1-2（A）および（B）の予測結果を組み合わせると、「二一世紀に必要な核分裂エネルギー産業の予測規模（絶対値）」が見えてくる。それが図1-2（D）である。それを見ると、やがては過去の発電実績の五〇〇～一〇〇〇倍という核分裂による巨大な発電総量が必要になることがわかる。

なお、この図では、一次エネルギー論議をみな「電力」表示で行なった。実際のエネルギーの利用形態はもっと複雑で、直接に熱の形で使用されるものも多い。だが、利用効率の問題もあり、

それらを分けて論議すると大局を見誤まる恐れがある。したがって、以後も便宜上すべて電力表示で一元的に考察することにする。

第二章　核エネルギーとは何か

人類と核エネルギー技術との関わりを整理する。
宇宙は核反応システムであり、地熱も地中の放射性物質から得られる。
核科学から人類は逃がれられない運命にある。

キュリーとアインシュタイン

一八九八年のキュリーによる放射性元素ラジウムの発見、それに続く放射性元素の化学的研究、フランスのキュリー親子、イタリアのフェルミ、ドイツのハーン、米国のシーボルグなどを中心とする超ウラン元素の発見に至る一連の研究の過程で、「核分裂現象」が発見された。核分裂の際に発生する莫大なエネルギーは、アインシュタインの相対性原理（一九〇五年）によって計算できる。

この発見は計り知れない意義をもつ。「物質量とエネルギーは相互の変換が可能である」という相対性原理の主張は、それまで核科学者の世界での話に過ぎなかったが、この核分裂現象を介して、一般市民や技術者のものにもなった。たとえば核分裂性元素ウラン235では、もともと二三五の重量分あったはずの物質が、核分裂により合計二三四・八ほどの重さの二つの原子核および各種素粒子（中性子や中間子など）に変わる。その差、すなわち消えた重さ〇・二が、二〇〇M（メガ）eV（エレクトロンボルト）というエネルギーに変換されるわけである（MeVとは、Mはメガで一〇〇万、eVは電子ボルト、つまり一〇〇万電子ボルトという意味だが、ここでは特殊なエネルギー単位と軽く受け止めていただきたい）。

通常の化学反応、たとえば水素と酸素が化合して水となる反応が最強であるが、そこで発生するエネルギーは一eV（二三キロカロリー／モル）程度であり、また、一般に原子核が変化する核反応（たとえば炭素14が電子を放出する形の崩壊をして窒素14になる反応など）で発生するエネ

ルギーは〇・一から数ＭｅＶまでである。これに対して、核分裂反応によるエネルギーは二〇〇ＭｅＶであるから、一般の核反応に比べれば二〜三桁、通常の化学反応に比べれば数億倍も大きい。これをいかに有効に人類に活用するのかが我々の課題である。

原子核、同位体、放射能

この先の話を理解していただくためにも、少し核化学の基礎をおさらいしておきたい。とはいえ今、我々が知っておかなければならない科学知識は、他のいかなる科学知識よりも単純極まりないものである。

そもそも原子核は、「陽子」（水素の原子核と同じもの）という正の電荷をもった素粒子と、それと同じ重さだが電荷をもたない「中性子」とが、いくつかずつ寄り集まってできている（それらをくっつけ合わせているのが、湯川秀樹博士が発見した中間子である）。その正電荷の総数（すなわち陽子の数）がその原子核の「原子番号」（これが元素の種類を決定する。たとえば原子番号六は炭素、七は窒素、八は酸素である）で、それはまた原子核の周りを走り回っている負電荷の「電子の総数」と同じである。こうして陽子と電子の数が同じだから、原子全体は電気的に中性になる。陽子の数と中性子の数を足したものが、その元素の質量数である（電子の質量は無視していいほどわずかである）。電子の運動領域が原子の大きさで、約一億分の一センチであるのに対し、原子核の直径はその約一万分の一、すなわち約一兆分の一センチということになる。

一番軽い原子は水素で、陽子一個と電子一個からなる。元素記号は「H」であり、原子番号は一番で、陽子一個のみだから質量数は一である。これを正式には「$^{1}_{1}$H」と書く。数字は下が原子番号で、上が質量数である。水素には質量数が二と三のもの、つまり陽子一個と中性子一個からなる「$^{2}_{1}$H」（重水素またはデュテリウム、Dと略称される）と、陽子一個と中性子二個からなる「$^{3}_{1}$H」（三重水素またはトリチウム、Tと略称される）もあり、これら三種を水素の「同位体（同位元素）」という。

このようにあらゆる元素には、原子番号は同じだが質量数が異なる（つまり中性子の数が異なる）いくつかの同位体が存在する。原発の燃料となっているウランを例にとれば、原子番号は同じ九二だが質量数はそれぞれ二三五と二三八の、ウラン235、ウラン238がある（前者は中性子が一四三個、後者は一四六個である）。天然に存在するのはほとんどウラン238で、核分裂を起こすウラン235はわずか約〇・七パーセント含まれるに過ぎない（ウランにはこの他の同位体もある）。

陽子一個と中性子二個からなる$^{3}_{1}$H（T）の原子核は、自然に一定の確率で崩壊し、（負電気をもった）電子e^-を放出する（この電子の流れをベータ線という）。その際、中性子のひとつが陽子に変わり、その結果、陽子二個と中性子一個からなるヘリウム3（$^{3}_{2}$He）の原子核に変化する（この変化で原子番号が一から二に変わり、元素が水素からヘリウムに変わるのである）。これを次のように記す。

$$^{3}_{1}H \longrightarrow e^- + {}^{3}_{2}He$$

表2-1　放射性崩壊による元素の変化

	放出体	崩壊により、原子核の変化する量および性質				
		質量数	中性子数	陽子数	核電荷	原子番号
アルファ崩壊	ヘリウム原子核(中性子2、陽子2)	−4	−2	−2	−2	−2
ベータ崩壊	電子(電荷−1)	0	−1	+1	+1	+1

これが、核反応の一種「ベータ（放射能）崩壊」といわれるものである。表2－1（上）に示したように、放出された電子の質量は無視できるので、質量数は三で変わらない。

このように原子核から電子などを放射する性質を「放射能」といい、放射能をもつ元素を放射性元素という。

放射能にはいろいろあるが、知っておきたいもうひとつの重要な放射能は「アルファ放射能」といわれるもので、これによって原子核からアルファ線（ヘリウム原子核$^{4}_{2}He$が高速度で飛んでいるもの）が放出される。この「アルファ崩壊」の場合には、元の原子核は中性子二個と陽子二個の放出で質量数が四つ減り、正電荷二個の喪失で原子番号が二つ小さくなる（表2－1参照）。アルファ線はベータ線（電子線）よりはるかに質量が大きい（つまり重い）ので、紙でも遮蔽できるくらいに透過力はないが、生体内に取り込んだ物質から発生すると、周囲の生体組織に深甚な影響をあたえる。

崩壊の速度は放射性原子核によって決まっている。最初にあった放射性原子核の総数が半分に減るまでの時間を「半減期」と名づけ、それで放射能の強さの変化速度を表す約束になっている。放射能の強さの単位はベクレルまたはキュリーであり、半減期相当の時間経過ごとに、強さは半分になる。

放射能と放射線

放射能と放射線という用語が、よく混同され、間違われて使われる。放射能とは「物質が全く自発的に『放射線』を放出する性質」である。性質であるから「漏れる」「浴びる」などの言い方は間違いである。「放射性物質（または放射性元素）が漏れた（を浴びた）」と言うべきである。ジャーナリストを含め専門家は特に、言葉の使い方に慎重であってほしい。

核反応に伴なって放出される放射線は、大きく「電磁波」と「粒子線」とに分けられる。電磁波は光線の仲間で、その中できわめて波長の短い領域のものを「ガンマ線」と呼ぶ。同じ電磁波でも日常浴びている可視光線の類（たぐい）は、化学現象・化学反応に伴なって発生しeV程度のエネルギーであるのに対し、ガンマ線はその数万〜一〇〇万倍のMeVレベルの核反応に伴なって発生する。「エックス線」（数〜数十KeV）もまた電磁波のひとつである。

粒子線の代表的なものは、まずベータ線（電子の流れ）、次にアルファ線（ヘリウム原子核の流れ）である。これは原子線・分子線といってもよいもので、物質の流れである。この他、陽子が飛ぶ陽子線、中性子が飛ぶ中性子線などもある。

核エネルギーの正体

ところで、（原子）核反応とはどのようなものだろう。とりあえず知っておいていただきたか

った例が、右に記した「アルファ崩壊」「ベータ崩壊」である。これらの崩壊では、放射能をもった不安定な原子核が自発的に核反応を起こして他の原子核に変わる。原子番号が変化して化学的に別の元素に変わるのだから、厳密には「核化学反応」というべきである。宇宙とは、原子核が核化学反応により生々流転しているシステムである。

その他一般的な核反応のひとつに、中性子が関与するものがある。中性子は電荷をもたないので、電気的な反発を受けず、容易に原子核に近寄り吸収されるのである。その結果、核の重さ（質量数）がひとつ増えるが、原子番号は変わらない。ただし一般的には、その原子核は不安定になって放射性元素となり、「ベータ崩壊」や「アルファ崩壊」をして、元素の種類が変わってしまうことが多い。

さらに、本書の主題となる「核分裂反応」の場合には、後述するようにウランなどが中性子を吸収して分裂し、原子核の重さが一〇〇あたりと一四〇あたりの二つの元素群（一般的にどれも不安定な放射性元素となる）に割れるのである。

実は「核エネルギー」とは、右の核反応に伴って発生する「原子核（化学）反応エネルギー」のことである。原子核が変化すれば、核の質量が微妙に変化する。総計の質量が減っていれば、その分がエネルギーとなって放出される。これがアインシュタインの相対性原理で保証されている。理論上では、かりに水素原子核（陽子）一個がすべてエネルギーに変換されたとすると、その変換で九三一ＭｅＶというエネルギーが得られる（これは、核分裂で得られるエネルギーの約四

倍半に相当するが、この変換はまだ実現されていない）。

また、さまざまな元素の原子核がすべて、同じ程度に安定なのではない。二〇世紀前半に核化学の基礎が整えられ、そうした各原子核の安定度が比較できるようになった。それを示したのが図２-１（左頁）の「原子核の結合エネルギー曲線」である。ここでは、結合エネルギーを核の質量数で割り、核子（陽子・中性子などのこと）一個当たりで表示していて、図中で低い位置にあるものほど安定である。一番低くなって安定なのは、重さ約六〇の鉄（Fe）・ニッケル（Ni）などである。したがって宇宙では、物質の生々流転の終点は鉄・ニッケルなどである。隕鉄が天から降ってくるのもそのためだし、地球の中心部はこれら鉄・ニッケルで構成されていると信じられている。

一般にこのように、より安定な方向へと核化学反応が進んで元素が変化し、物質が変化する。各種の元素はこうした核化学的変化によって相互に関係してくる。核エネルギーがこうした「化学反応」の産物であることは、本書を読み進めていただく上でのポイントになる。「原発」（原子核エネルギー利用発電所）は「化学反応装置」なのである。各種元素の化学的特性を思い出していただくために、周期律表を図２-２（58頁）に示しておこう。

核分裂とは何か

さて、主題である「核分裂反応」に目を向けよう。

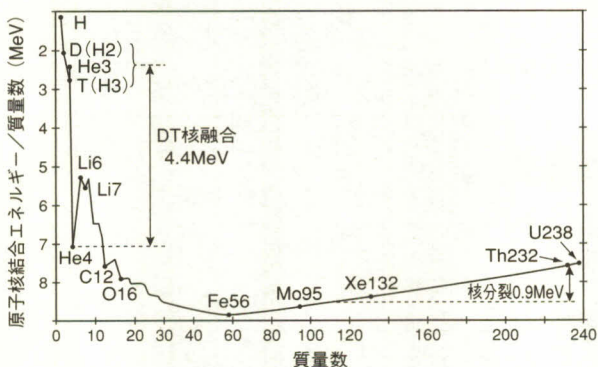



図2-1　原子核の結合エネルギー曲線

核分裂はきわめて特異な核反応の一種である。天然に存在する最も重い元素はウラン（U、原子番号九二）だが、そのうちの二三五の重さの同位体（ウラン235）は核分裂を起こしやすい。その原子核は九二個の陽子と一四三個の中性子からなるが、これらの素粒子は核内で液体中の分子のようにザワザワと動いている。ちょうど丸い「液滴」状になっていると考えるとよい。

そこに、外からもう一個中性子が飛び込んでくると、まことに異常な現象が始まる。突如、液滴は不安定に踊り始め、中央がくびれ、図2-3（59頁）に示したように二〜三個の中性子を放出しつつ、ほぼ真二つに割れるのである。核分裂しやすい原子核を「核分裂性核種」という。

この二つの破片（核分裂生成物）は、正確に真二つではなく、重さ八五〜一一〇くらいと一三〇〜一五〇くらいの二群の原子核に分かれる。一見奇異に思われ

I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	VIII	VIII	I B	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	0
○1 H 1																	2 He 4
3 Li 6.9	○4 Be 9											5 B 10.8	○6 C 12	7 N 14	8 O 16	9 F 19	10 Ne 20.2
11 Na 23	12 Mg 24.3											13 Al 27	14 Si 28	15 P 31	16 S 32	17 Cl 35.5	18 Ar 40
○19 K 39.1	20 Ca 40	21 Sc 45.1	22 Ti 47.9	○23 V 51	24 Cr 52	25 Mn 54.9	26 Fe 55.8	27 Co 58.9	28 Ni 58.7	29 Cu 63.8	30 Zn 65.4	31 Ga 69.7	32 Ge 72.6	33 As 74.9	34 Se 79	35 Br 80	36 Kr 83.8
○37 Rb 85.5	38 Sr 87.6	39 Y 88.9	40 Zr 91.2	41 Nb 92.9	42 Mo 96	●43 Tc 99	44 Ru 101	45 Rh 103	46 Pd 106	47 Ag 108	48 Cd 112	○49 In 115	50 Sn 119	51 Sb 122	○52 Te 128	53 I 127	54 Xe 131
55 Cs 133	56 Ba 137	57～71 ※	○72 Hf 179	73 Ta 181	74 W 184	○75 Re 186	○76 Os 190	77 Ir 193	○78 Pt 195	79 Au 197	80 Hg 201	81 Tl 204	○82 Pb 207	○83 Bi 209	●84 Po 210	●85 At 210	●86 Rn 222
●87 Fr 223	●88 Ra 226	89～103 ※※	●104 Rf 261	●105 Db 262	●106 Sg 263	●107 Bh 264	●108 Hs 265	●109 Mt 268	●110 Uun 269	●111 Uuu 272	●112 Uub 277		●114 Uuq 289		●116 Uuh 289		●118 Uuo 293

※	○57 La 139	58 Ce 140	59 Pr 141	○60 Nd 144	●61 Pm 145	○62 Sm 150	63 Eu 152	○64 Gd 157	65 Tb 159	66 Dy 163	67 Ho 165	68 Er 167	69 Tm 169	70 Yb 173	○71 Lu 175
※※	●89 Ac 227	●90 Th 232	●91 Pa 231	●92 U 238	●93 Np 237	●94 Pu 239	●95 Am 243	●96 Cm 247	●97 Bk 247	●98 Cf 252	●99 Es 252	●100 Fm 257	●101 Md 258	●102 No 259	●103 Lr 262

※希土類元素　※※アクチノイド元素　○安定および放射性天然同位体　●不安定同位体

図2-2　元素の周期表（理科年表を参考）

上の数字は原子番号、下は原子量。主要な核分裂生成物にはアミをふせた。

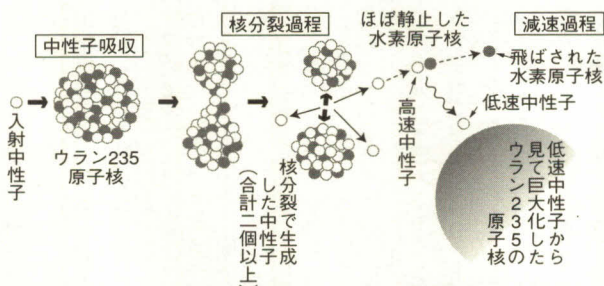



図2-3　ウラン235の核分裂と中性子減速過程の模式図
（ウラン233とプルトニウム239も同様）

るかもしれないが、図2-1から見れば当然で、図の右側に示したように、核分裂の結果、全体はより安定な状態（原子群）に移行するのである。ただし、図の右側の重い原子核がみな核分裂を起こすわけではなく、起こしやすい原子核はウラン235などいくつかに限られる（もっとも、飛び込んでくる中性子のエネルギーが非常に高いと、種々の重い原子核で少し核分裂が起こる）。

ウラン235の核分裂により放出された中性子は、まだ分裂していないウラン235に吸収され、連鎖的にそのウラン235の核分裂を引き起こす。この連鎖反応が継続できるようにコントロールされた状態を「臨界」と呼ぶ（臨界を超えた制御不能な暴発的連鎖反応を兵器に利用するのが原爆である）。この連鎖反応の過程で、ウラン238からプルトニウム（Pu、原子番号九四）・アメリシウム（Am、原子番号九五）などの、ウランより重い人工の放射性元素が生まれる。これらを「超ウラン元素」という（このウラン238の反応の過程は139頁図6-2参照）。

なお、超ウラン元素は、きわめて微弱だが中性子を吸収しなくても自動的に核分裂する性質をもっている（半減期でいうと兆年以上で計測するような反応速度である）。ただし、プルトニウム240は比較的短く一三四〇億年であり、放出された中性子が強く核爆発を誘導する可能性がある。したがって、これを必ず少しは含むプルトニウム原爆は、ウラン原爆より設計が困難である（第一〇章で再論する）。

速度の遅い（つまりエネルギーの低い）中性子で容易に核分裂現象を起こす核種（核分裂性核種）は、天然にはウラン235しか存在しないが、次に示すように、核反応で新たに核分裂性核種を作り出すことはできる。

天然には、ウランに次いで重い原子番号九〇のトリウム（Th、トリウム232）という元素がある（九一番目のプロトアクチニウム〔Pa〕は放射性で、天然にない）。一般にはあまりなじみのない元素だろうが、このトリウムは本書の主題のひとつで、きわめて重要な資源である。さて、このトリウム232と、天然ウランの主成分（九九・三パーセントを占め、非核分裂性）のウラン238は、中性子を一個吸収させると、それぞれ「トリウム233」、「ウラン239」になり、さらに二回ベータ崩壊して（つまり中性子二個が順次陽子二個に変化し、原子番号が二つ増えて）「ウラン233」、「プルトニウム239」になる。これらは人工の核分裂性核種である（137頁図6-1参照）。原料となるトリウム232やウラン238を「親物質」という。

核分裂で生まれた物質（核分裂生成物や中性子）は、高速で放出される。また、多量のガンマ

線その他の放射線も伴なう。それらは機械的運動量により、あるいは電磁気的な力により、周囲の物質に影響をおよぼしながら、速度・エネルギーを失ってゆく。周囲の物質から見れば、エネルギーを得て温度が上がり、また、衝突されて化学結合を切られ、正常な位置から追い出され、その追い出された原子がさらに隣の原子をはじき飛ばす、といった複合的な作用を受けて、分子や結晶が破壊されることになる（これを「照射損傷」という）。

核分裂を説明する上できわめて重要なポイントがもうひとつある。たとえば、ウラン燃料を使う原発の場合、ウラン235の核分裂で生まれる中性子は、そのウラン235の連鎖反応に関わるだけではなく、直前に述べたように、本来燃えない（核分裂しない）ウラン238にも吸収されて、それを核分裂性核種のプルトニウム239に変えてしまうのである。つまり、燃やす端から燃料を再生するわけである。こうして核分裂で消えた燃料が一部補充される。

その再生転換率が一（燃えた量と同量が補充される状態）以上、すなわち自給自足を超えて余る場合は「増殖」されたと称し、発電しつつこうした増殖ができる炉を「増殖発電炉」という。通常の原発では再生転換率が半分くらいと低く増殖できないが、仮に増殖可能な炉ができたとしたら、その再生核分裂性核種を化学処理して集めれば、外国から核燃料を買わなくてもすむ。それで、ウラン資源の寡占状態から逃れ自前のエネルギー資源を確保するためにも、増殖発電炉は必須だ、として、日本では高速原型炉の「もんじゅ」が造られた。いまだにこれを「夢の発電炉」のように言う人がいるが、第八章で述べるように、それは幻想である。

以上が核分裂反応の概要だが、この現象を有効安全に利用できるかどうかが、本書の主題である。その話題に移る前に、将来、核分裂炉に代わるものといわれている「核融合」について考えてみよう。

核融合の仕組み

核融合は「分裂」とは正反対に、二つの原子核を合体させ、その際発生するエネルギーを利用しようというもので、核分裂性核種が限られている核分裂反応とは違い、多数の核反応形式が考えられる。なぜなら、図2-1（57頁）の曲線の左側部分を見れば明らかなように、充分軽い原子核同士が合体してより重くなれば、より安定になるからである。安定化した分だけエネルギーが得られる。これが「核融合」であり、種々の軽い核の間で実現できる。

しかし、核同士を融合させるには、原子核がもっている正の電荷同士の強い電気的反発力に抗して近寄らせなければならない。このために、輝く太陽やその他の恒星の内部のような、何億〜何百億度の高温が必要となる。

種々の核融合反応の中で、得られるエネルギー量の多さおよび必要な反応温度の低さの面で、ともに桁違いに有利なのは、重水素（陽子一個と中性子一個からなるデュテリウム、D）の原子核と三重水素（陽子一個と中性子二個からなるトリチウム、T）の原子核を融合させ、ヘリウム（He、陽子二個と中性子二個からなる）を作り出す反応である。これは「DT核融合」と略称されるが、

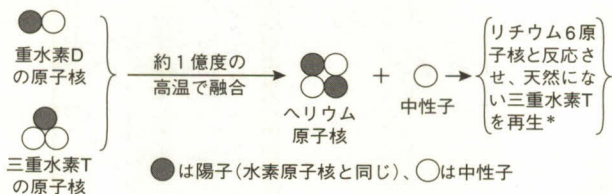



図2-4　DT核融合反応の図解

＊$^{6}_{3}$Li（リチウム6）＋n（中性子）→$^{3}_{1}$H（三重水素T）＋$^{4}_{2}$He（ヘリウム）

それでも約一億度に加熱しなければならない（上の図2-4参照）。核分裂反応では加熱が不要であったのに比べ、融合に必要な加熱エネルギーは莫大で、大きな弱点である。なお、トリチウムTは半減期約一二・三年でベータ崩壊する。天然にはほとんど存在せず、リチウム（Li、原子番号三）に中性子を反応させて生産しなければならない（第五章参照）。

しかも一核反応当たりの熱発生は、核分裂の場合の一〇分の一に過ぎない。図2-1から見ると一見逆に思われるかもしれないが、図では核子（陽子や中性子）一個当たりのエネルギーが示されている。つまりDT核融合の場合は、形成されるヘリウムの質量は四だから、一核反応当たり（4.4MeV×4＝）一七・六MeVであるのに対し、ウラン235の核分裂では、（約0.9MeV×235＝）約二一〇MeVとなって、前者は後者の一〇分の一以下に過ぎないのである。

さらにいえば、反応で発生する中性子のエネルギーは、核分裂では一〜二MeVであるのに対し、DT核融合では約一四MeVと一〇倍大きく（つまり高速となり）、反応炉の設計はそれだけ難しくなる。すなわち、そのような高速中性子にさらされた炉容器材料は、

照射損傷のために何年もの使用に耐えられなくなるのである。

なお、超高温の重水素Dやトリチウム（三重水素）Tは、原子核の周りにある電子がばらばらに離れた電離ガス（プラズマ）状態となっていて、核融合反応はその中で進む。

第二次世界大戦後、列強諸国は、核融合で生まれる高速中性子を使って天然ウランから原爆用のプルトニウムを作るために、極秘裡にDT核融合の研究を続けていた。しかし、極端に困難なことが見えてきた頃の、一九五五年の原子力平和利用国際会議の冒頭で、議長のインドのバーバ博士がそうした軍事研究の実情を暴露し、「二〇年後には核融合エネルギーの平和利用が始まる」と語って、世界を驚倒させた。その後、困難は何ひとつ打開されないまま十数年が経過した。

一九六〇年代後半に入り、核分裂による発電炉のトラブルが続発し、社会の批判・拒否反応が強まってきた。その最中の一九六九年に、ソ連から核融合研究上の優れた成果が発表された。「トカマク」という方式による核融合プラズマの磁場閉じ込めがかなりうまくいった、というのである。

それ以降、このDT核融合は、ウラン・プルトニウムなどを燃料に使わないので核分裂生成物などの核廃棄物が生じない、よりクリーンであり安全だ、と大いに宣伝され、世界中で多大な研究投資がなされた。しかし、反応の主役のトリチウムTは、半減期約一二・三年でベータ崩壊する放射性物質である。しかも、最も閉じ込めにくい（高温では容易に種々の金属を透過してしまう）元素であり、また、水素成分として（トリチウム〔三重水素〕は水素の同位体）、生体に吸収

されやすい危険物質でもある。

核融合は技術対象以前

それ以前の根本的問題もある。プラズマ状の軽い原子核をうまく閉じ込めることができさえすれば、核融合は効率よく進められる、というのが核融合研究者の言い分だが、それ以前に、そもそもプラズマ物理学の理論的基礎ができていないのである。したがって、実用炉と同寸法のフルサイズ実験装置を常に要求する。小型ではとても現象の本質に迫れないからである。それで一気に、一兆円で「実験炉ITER（イーター）」を国際共同で造りたい、というようなことになる。

私も一九七〇年から約一〇年間、核融合炉の開発に挑戦し、熔融塩利用（熔融塩というのは液体の一種で、後述するように、これまた本書の主題のひとつである）を中心に研究を進めたが、プラズマ物理以外にも、「構造材料を含め炉化学的難問がまだあまりにも多過ぎる」というのが結論で、今後数十年内の実用化の見通しはないと判定し、核分裂利用の研究に戻った。これが世界の大勢である。「材料を含めての化学が終わらずには炉工学は始まらない」のである。

日本政府が支出した研究費だけでも、すでに八五〇〇億円という巨額になるが、その後何ら本質的進歩はなく、実用的な炉の設計研究などが進められる段階にはない。この二〇年来、世界的に投資は急速に後退し、唯一の例外が日本である。これはどう考えたらよいのか。政府の年間の原子力全体予算は約三〇〇〇億円で、欧州諸国の一〇倍以上ありながら、エネルギー政策に迫力

を欠く事態を招いている。

なお、この「核融合実験炉」といわれているものは、核分裂炉開発時代の定義、すなわち実用炉のパイロット・プラントに相当するものではない。実用炉の基本設計などは全く存在しない状態で、一部のプラズマ物理工学実験を行なうものに過ぎない。それさえ巨大にならざるをえないのは、どこか間違っている。経済的なエネルギーを得るには、原理的に新しい研究工夫が求められる。何はともあれいかに至難でも、理論物理的基礎を確立すべきである。

私は研究を止めよと言っているのではない。逆に、もし良い発明考案に成功し、DT核融合から経済的に中性子が得られるようになれば、三〇年後あたりにはトリウム232をウラン233に変換するのに使いたいものとも思っている（その意味するところは第八章で述べる）。ただ、前に述べたように、そもそも核融合研究は、戦後すぐの原爆不足（米国にも実は原爆はなかった）時代に「有効な中性子入手法・原爆原料製造法」として、列強諸国が秘密裡に激烈な競争をしたのが発端だったことを、忘れてはならないだろう。そもそもエネルギー用ではないのである。

宇宙は核反応システムである

ところで、私は「原子力」という言葉が嫌いである。なぜ「原子力」なのだろう。原子の関わる化学反応であるというのならば、まさに「化学力」である。「原子力エネルギー」などと言わず、素直に「(原子) 核エネルギー」と言えばいいではないか。「核」は核兵器を連想させるから

嫌と言う人がいるが、本末転倒である。正しい認識は、正しい用語から始まる。
　宇宙は星が核反応を起こしつつ生々流転するシステムである。流転の根源は核エネルギーで、太陽エネルギーもまた、水素がヘリウムとなる核融合反応で生まれる。
　したがって、地上には宇宙から光線・熱線の他にさまざまな放射線が降り注いでいる。また地中からも、カリウム・トリウム・ウランなどの放射性元素の崩壊で生まれた放射線がやってくる。我々は常に、年間一〜二ミリシーベルトの放射線を浴びているのである。しかもそれには、地域によって数倍の強度差がある。地球の生物は、これだけの放射線と共存して健全に生きているのであって、これをなくせば、かえって複雑な生理異常が発生するだろう。
　地球が昼夜や季節にそれほど影響されずに、生物の生存に適した環境を保っている一因は、ほどよい地熱の存在にあるが、これももっぱら地中の核エネルギーに起因している。地球創生の初期には、地熱はその大部分がウラン235とカリウム40の崩壊熱によった。その後、放射能をもつ元素の総量は六分の一くらいに減ってしまったが、今でも地熱の大部分は、半減期四五億年のウラン238と一四一億年のトリウム232（約一五パーセントは一二・六億年のカリウム40）の崩壊熱による。こうした地中の放射性元素の崩壊熱の総量は、現在人類が燃料を燃やして発生させている総熱量の約二倍である。

かつて天然の核分裂炉があった！

このように、我々は核化学反応システムそのものの宇宙の中に、どっぷり漬かって生きている。医療や諸工学領域では、放射性物質や放射線からさまざまな恩恵をさえ受けている。「核科学は不要だ」などとは間違っても言えないはずなのである。

核分裂反応の人間社会への利用は、自然の摂理に反した人類の思い上がった行為だ、という意見をもつ人もいるかもしれない。しかし、実はこの地上には、かつて天然の核分裂炉が存在していたのである。運転（稼働）されたのは約二〇億年前、場所はアフリカ中西部のガボン共和国のオクロ・ウラン鉱山地帯である。一九七二年にフランスの鉱山技師が、ウラン235濃度が異常に低い鉱石を発見したことから判明した。一六ヵ所以上の地点で炉が稼働していたことが、すでに確認されている。そのうちの初期に発見された六ヵ所は寄り集まっていて、その総発熱量は、今の一〇〇万キロワット原発の五基が一年間に放出する熱量に相当するという。核分裂を起こして消えてしまったウラン235の総量は、約六トンである。

なぜ天然の核分裂炉が存在しえたのかといえば、ウラン238の半減期が四五億年なのに対し、ウラン235は七億年と短く、二〇億年前には235が全ウラン中で、現在の約〇・七パーセントより多い三パーセントを占めていたからである。このウラン235濃度は、現在使用されている標準的な軽水炉原発の核燃料濃度の三～四パーセントとちょうど同じで、雨水が沁み込めばそれが「減速材」になって臨界となり、継続的な核分裂が起こっても不思議はない。ただし、発熱するとその熱で

「減速材」の水分が蒸発してなくなり、炉は停まる。これを繰り返したものと思われる（なお、「軽水炉」や「減速」の意味については次章で解説する）。
この事実は、単にSF的な興味に留まらず、「いかに核分裂連鎖反応の実現が容易であるか」を示してくれている点で重要である。同じことが十数年前（一九九九年）、茨城県東海村の工場の沈殿槽の中でも起きたこと（核燃料製造施設JCOにおける二名の死亡者を出した臨界事故）を、今や多くの日本人が知っているわけではあるが。
なお、興味ある歴史的事実として、日本の優れた放射化学者の故黒田和夫博士（二〇〇一年四月死去）が、天然の核分裂炉発見の一六年前の一九五六年に、その可能性を科学的に予言していたことを記しておきたい。彼はその一年前に米国に帰化していたが、東大理学部化学科で育ったので、本人が「天然原子炉説の起源は日本であると考えていただきたい」と言っている。彼がノーベル賞をもらわなかったのは残念である。
ちょっと脱線かと思われるが、核化学反応は、元素自体を変化させるという意味では、いわば現代の錬金術といってよい。そう言うと、「では、水銀を金に変えられますか？　変えてもらえますか？」とよく聞かれる。みなさんはご存知だろうか。残念ながら中世の化学者の願いに反して、それはまず不可能だが、逆に金を水銀に変えるのは、意外にも特別に簡単なのである。原発の炉心に金を一年間入れておくと、約半分が水銀になってしまうのである。神様はお茶目な方らしい。

第三章　今の「原発」のどこが間違いか

過去から現在までの核エネルギー技術の実態・基本構造を解説する。今の「原発」（原子核エネルギー利用発電所）がなぜ嫌われるのか、どこが原理的に間違っているのかを明らかにしたい。

軍事利用と平和利用

核エネルギー技術と人類との関わりの幕開けは、まことに不幸だった。核分裂現象発見が第二次世界大戦前夜の一九三八年、原爆完成・使用が一九四五年であり、さらに大戦後進められたのは、潜水艦や航空母艦推進用の核エネルギー発電炉の開発だった。原発を搭載して運転すれば、一年もしくは数年間は燃料補給の寄港をしなくても活動できる。したがって原潜は、今でもその廃絶をだれひとり議題としないくらいの究極兵器であるらしい。

このため各国の原潜開発競争は熾烈(しれつ)をきわめた。経済性はさておいて、その性能・信頼性のみが早急に求められたに違いない。米国では、初期には液体金属ナトリウム冷却炉を搭載した原潜などが、ゼネラル・エレクトリック社の手で試運転されたりしたが、いち早く軍用炉として定着したのは、産業革命以来、熱機関用の技術として最も手馴れた水蒸気発電技術を基盤とする「軽水冷却炉」(軽水とは通常の水のこと。これを核反応熱の取り出しに利用する原発)、中でも加圧水型軽水炉だった。この軽水炉は民間用原発としても実用化され、現在も主流となっている。

一方、核エネルギーの平和利用としての発電炉開発は、一九四一年あたりから組織的に始まり、一九五三年、国連において米国アイゼンハウァー大統領が「ATOMS for PEACE」と呼びかけたことで、一気に高まりを見せた。一九五五年にはIAEA(国際原子力機関)が作られ、第一回原子力平和利用国際会議が開かれた。結論的にいって一九五〇~六〇年代は、かなり自由公明に、世界中で核エネルギーの平和利用へ向けた研究開発が進められていたのである。

軽水原発の仕組み

現在、全世界で実用化されている原発の約八〇パーセントは軽水冷却型であり、「軽水炉」または「軽水原発」と略称されている。市民レベルにもこの名はかなり知られていて、この炉のみが原発であるかのような論議が一般的である。しかし、この炉のみで「反対」「賛成」が結論づけられているのはおかしい。

原理的にどこが問題であり、どこが間違っているのか、どういう点をどう改善したらよいのかを探る目的で、軽水炉の概要を少し詳しく述べておきたい。

現在の火力発電所は、ほとんどすべて水蒸気発電技術に基づいている。したがって、その技術と核分裂エネルギー発生装置とをうまく連携させようと、さまざまな考案工夫が試みられた。そのひとつが、核燃料物質を細い金属管内に熔接封入して発熱させ、その外側に水を流して熱を取り出し、そうして得た熱水で最終的に水蒸気タービンを回して発電する、という方式である。

全体の構成としては、炉本体内部では水を沸騰させず、炉外に熱水を循環させた上で熱交換器により外部の水を沸騰させる「加圧水型軽水炉」（世界の軽水原発の四分の三がこれ）もあるが、ここではもうひとつの「沸騰水型軽水炉」を紹介する。この炉は日本では東京電力や中部電力などで採用されている。大事故を起こした福島第一原発もこの方式で、炉内で発生した水蒸気で直接タービンを駆動させる単純なものである（次頁図3－1参照）。

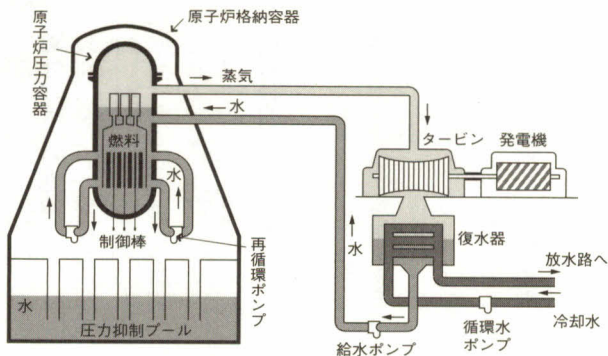



図3-1　沸騰水型軽水炉の基本構成

炉本体の模型図は図3－2（左頁）に示した。事故報道でよく目にされた方も多いことと思う。炉容器は数十気圧に耐えられるように、約一七センチ厚の耐圧ステンレス鋼内張りの低合金鋼でできている。中心部は「炉心」といわれ、数万本の燃料棒が納められている。燃料棒には、表3－1（76頁）の設計仕様に見られるように、内径約一センチの細いジルコニウム合金円管（燃料被覆管）内に、酸化ウラン粉体を円柱状に固めたペレットが充塡されている。この燃料棒を数十本束ねて燃料集合体とし、それを炉心に出し入れする。

炉の運転状態では、この燃料体が核分裂による発熱体となって、その周囲を上向きに流れる水を加熱沸騰させるわけである。これは火力発電所のボイラーの燃焼加熱管とそっくりである。その先の発電システムは両者でほとんど差異はない。

最新鋭の沸騰水型原発（東京電力・柏崎刈羽（かりわ）の六、七号機）の模型図を図3－3（77頁）に、主要設計仕

図3-2　沸騰水型軽水炉本体と燃料集合体の模型図（東芝資料）

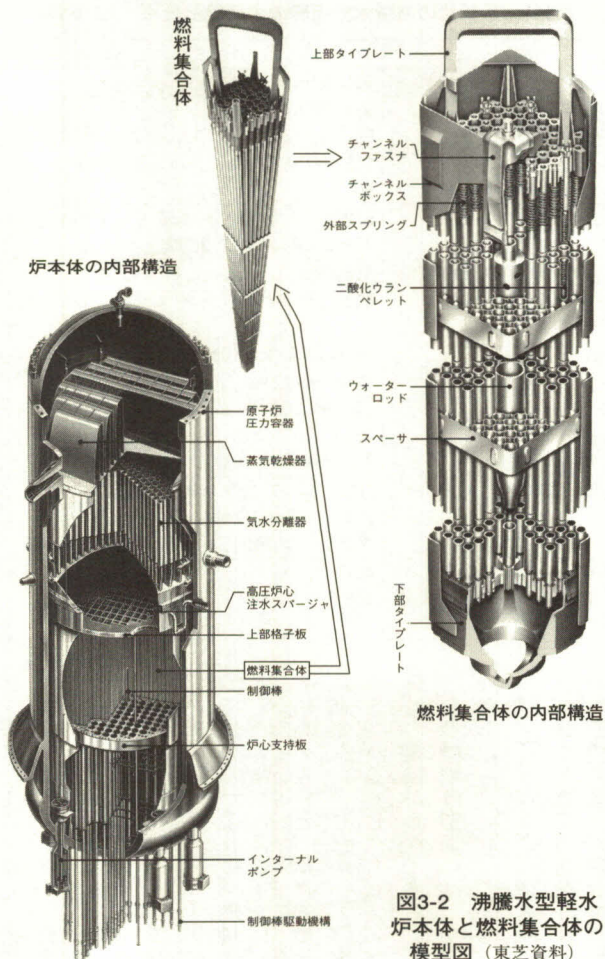



表3-1　最新鋭の沸騰水型原発の主要設計仕様（東芝資料）

項　目	特　性　値
電気出力（熱効率）	135.6万kW（35%）
炉熱出力	392.6万kW
炉内圧力	73.1kg／cm²
水温度	215 → 287℃
炉心平均出力密度	50.5kW／リットル
燃料集合体（配列）	872体（8本×8本）　長さ：4.5m
燃料棒本数	872体×60本＝52,320本
平均ウラン濃縮度	約3.5%
平均燃焼度	約39,500MW日／トン
燃料棒	
ペレット	10.4mm直径×10mm長
ペレット材質	ウラン酸化物（UO_2） 一部にガドリニウム添加（最大7.5%）
被覆管	12.3mm外径（0.85mm厚）×3.7m長
被覆管材質	ジルカロイ2（ジルコニウム内張り）
制御棒本数（材質）	205本（ハフニウムまたは炭化ボロン）
炉圧力容器	7.1m内径×21m高
材質	ステンレス鋼内張り低合金鋼（17cm厚）
定期検査日数	45日
低レベル放射性廃棄物	100ドラム／年

様を表3－1に示した。解説は略すが、参考にしていただきたい。

軽水、すなわち普通の水を冷却兼減速材（後述）として利用するときは、「天然原子炉」の話で紹介したように、燃料中のウラン235濃度を三～四パーセントに高めないと、連鎖的核分裂は進まない。したがって、天然ウランの〇・七パーセントから軽度の濃縮が必要である。

この濃縮は初期には、ウラン235からなるガス分子（六フッ化ウラン）のほうが、少し重いウラン238からなるガス分子より、細い隙間を潜り抜ける速度が早

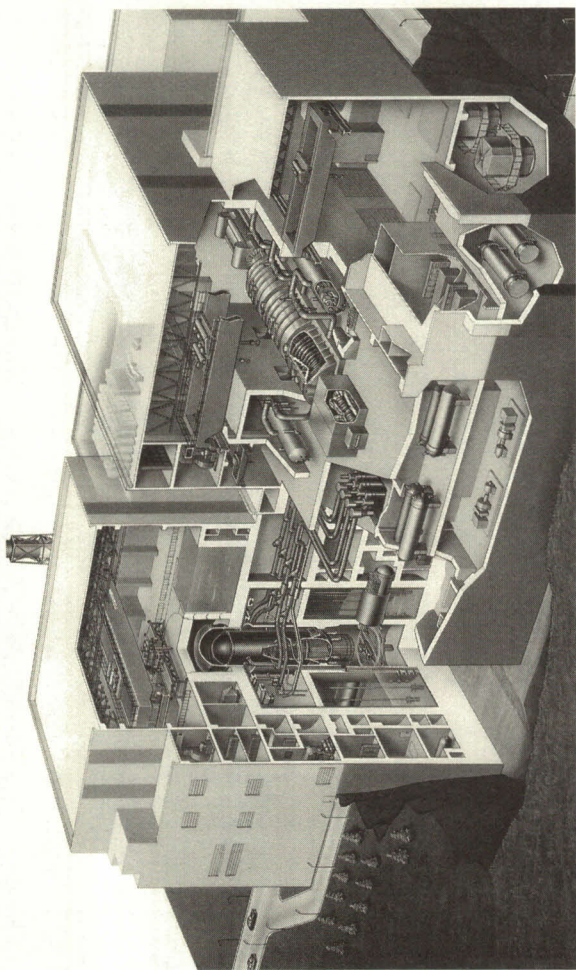



図3-3　最新鋭の沸騰水型原発の模型図（東芝資料）

いのを利用する「ガス拡散分離法」によったが、現在は、高速回転する円筒内で、より重いウラン238からなるガス分子が外周に集まるのを利用する「遠心分離法」が、さらに経済的で、主流である。

「制御棒」は中性子をよく吸収する物質からなり、その出し入れで核反応に関与する中性子の量を調節して、炉心出力を一定に保つ役割をする。炉は運転を進めると、核燃料が燃焼して燃料不足（燃えた燃料の五～六割しか再生しない。この「再生」の意味は第六章参照）となり停まってしまうので、本来の出力からすると多量な余分量の燃料が運転前に装荷されている。初期は数百本の制御棒で余分な中性子を吸収し、装荷された余分な燃料の能力を相殺しつつ、出力を一定に保つわけである。

軽水原発の主要問題点

このように、軽水原発は原理的に単純であるから広く実用化されたが、今回の福島原発事故が起こる前から、先進国のほとんどが見限りつつあった。それはなぜか？

実は、「火力発電所の原理」には忠実でも、「核エネルギー発電所の原理」に反しているからである。以下に、その主要な問題点・難点を列記し、以後順次その解決策を示したい。

（一）核燃料体が固体であり、それが密封されている

核燃料体は薄い燃料被覆管内に収められるので、次のようなことが問題となる。燃料体も被覆

管も放射線照射による損傷を受け、変形・変質してしまうこと、その損傷の修復や「燃えかす」の核分裂生成物の除去をするには、一旦運転を止めて燃料棒を取り出し、溶解抽出その他の化学処理をしなければならないこと、核分裂生成物としてガスも発生するが、それが管内部へ密封される結果、高圧となってしまうこと（このことは、管の破損時に外部にガスが噴き出す危険を生む。また、ガスによる強い中性子吸収で反応効率が落ちる）、などである。燃料体が固体であるのがよくないのである。第五章で検討しよう。

（二）燃料集合体の交換・位置換えの作業量が膨大である

燃焼に伴う核反応能力の劣化を補うため、前述したように一〇〇本、二〇〇本という多数の炉制御棒を挿入し前もって反応の進行を抑えこみ、後で少しずつ引き抜くことが必要となるので、必然的に反応効率は悪い。さらに、劣化した燃料集合体を一～二年ごとに位置換え、ないし交換しなければならない。薪による焚き火にたとえれば、置く場所によって燃え方が変わるので、燃えていない薪をよく燃えるところへ移し換えるのが「位置換え」、燃え残りはあるがこれ以上燃やしても効率が悪いとき、その焚き火は止めにして、新たな薪で火をおこすのが「交換」である。

（三）運転性能が柔軟でない

一度炉を停止すると、再起動が困難となることがある。核分裂で生成したキセノン（Xe）などのガスが、強い中性子吸収をして、核反応の進行の邪魔をするからである。また、熱出力変動は固体核燃料内部の温度分布を激しく変化させ、より早く燃料体を劣化させるので、なるべく避け

たい。さらに、資本費が高く利子が大変なので、装置を遊ばせず常に全出力で運転したい。こうしたことから、電力負荷の変動に対応（電力が必要なときには高出力に、それほど要らないときには低出力に）させるよりは、基幹電力を常時供給するベースロード用発電所として使われる。変動に対応するのは火力などに任せるわけである（第七章で再度触れる）。

（四）小型炉に適さない

（二）の交換・位置換えなどと関係して、必要となる特殊機器や運転保守点検作業が少なくない。したがって、炉規模を大きくしてそうしたコストを吸収し、経済性を高めなければならない。送配電規模の大きい先進国はまだよいが、全世界で利用するには経済的な小型炉が必須である（第七章）。なお、大型炉は往々にして都市などの需要地から遠く立地せざるをえないが、長距離送電は電力コストを倍増させてしまう。

（五）冷却材・減速材に水を使用している

水を熱エネルギーの伝達媒体（つまり冷却材）として使うときの弱点は、あまり高温にできないということである。なぜなら、水は高温で高圧になるが、設計上高圧は避けたいからである。その結果、せっかく核反応で高い発熱があっても、その熱を有効に取り出せず、発電効率が約三三パーセントと低くなり、発熱の三分の二が廃棄される（これは熱公害となる）。また、水は放射線で分解され、爆発の危険性のある水素を発生する。高温高圧水による材料の腐食も難問（左記参照）である。炉心に水を使用しない工夫が求められる。

（六）ウラン燃料中にプルトニウムなど超ウラン元素が生成される
　プルトニウムは核兵器の原料となり、その核拡散・核テロ対策が大きな問題である。第六・一〇章などで論議したい。

　詳しい論議はこれからだが、「材料腐食問題」だけはここでもう少し説明しておきたい。
　現在、ニッケル・クロームなどを二〇〜四〇パーセント含んだステンレス鋼が、炉容器の配管・機器材料として使われているが、これは通常の鉄鋼とは本質的に異なる合金で、軽水炉が開発される以前は、水ボイラー材としては使用禁止されていた。特に、形を歪ませる力のかかったステンレス鋼では、異常な水腐食が急速に進行し、数センチ厚の板も割れてしまうことがあるからである。原発ではさらに、中性子の強い照射を受けるので、次第に脆くなる。事実、ひび割れの進行がひどくなって、炉容器・水蒸気発生器などの大がかりな取り替えを要した例は少なくない。したがって、高温水とステンレス鋼との組み合わせは決して好ましいものではないが、鉄鋼はすぐ酸化し、放射能を帯びた錆が剝離飛散するので、やむなくステンレス鋼が使われている。

原則に従えば炉設計は容易

　そもそも、核分裂エネルギー発電システムの「原理原則」ないし「基本的な技術問題点」は簡明なものである。しかし、軽水原発はこれらに忠実ではない。

核分裂反応の場合のみでなく、核反応の主役は中性子である場合が多いが、これは電荷が関係しない反応過程なので、計算量は大きくなるが内容はきわめて単純である。ある速度で中性子が飛んできて、ある原子核に衝突し、ある確率で吸収されて、何らかの核反応を起こしたり跳ね返されたりする様子を、計算すればよいからである。電子計算機の仕事に打ってつけである。したがって電子計算機開発の初期から、一番大型高性能の計算機の需要者は炉の設計グループだった。

ただし、実際の炉の本格的な設計を開始するには、あらかじめ次の三つの設問を立て、その答えを用意しておかなければならない。後から考えたのでは、良い炉はできない（軽水原発は少なくとも次のA、Cを無視した）。

A 核反応による放射損傷は、核燃料自体にも、容器材料にも起こる。したがって、まず放射線に耐える核燃料・容器材料をどう選ぶか？

B 核反応熱を取り出し、電力に変えなければならないが、そのエネルギー変換の技術をどうするか？

C 核燃料は核反応の進行により、出発物質からいろいろな元素・化合物に変化する。こうした化学変化は核燃料の劣化なので、効率のよい反応進行のためには、その各種生成物を反応の邪魔にならぬよう取り除いたり変化させたりしなければならないが、そうした化学処理をどう進めるか？

これらについて基本に戻って考えよう。そして、先に説明した代表的な軽水炉原発の矛盾（前

述の一〜六）を解決し、最も良い核エネルギー発電炉を造るにはどうしたらよいかを探ろう。

A　放射線に耐える核燃料・容器材料をどう選ぶか？

炉は核化学反応を利用する装置だから、核反応により発生する種々の放射線の照射に耐える核燃料・容器材料で造るべきである。放射線を受けると、たとえば固体燃料では化学変化の結果、別の物質に変わったりガスが発生したりして形が崩れてしまうし、容器材料によっては劣化・変質・破断などが起こってしまうからである。核燃料を気体や液体に気化・溶解して使う場合には、その媒体となる気体や液体も放射線を受ける。したがって、それらの物質を、中性子などの放射線とあまり核反応を起こさない元素（原子核）群から選ぶべきである。特に、B項で述べる理由により、「遅い速度をもった（つまりエネルギーの低い）熱中性子（後述）」の吸収反応が少ない元素（88頁表3－2）から選ぶ必要がある（高速中性子に対する振る舞いには、元素による差違が少ない）。

以上を要約すれば、必要な核分裂以外の核反応はあまり起こさず、中性子などで叩かれても、温度が上がるだけで、核燃料・容器材料の形状や性質に変化を起こさないことが大切、ということになる。

もうひとつのポイントは、物質の状態である。

一般に物質は、気体・液体・固体の三つの状態に分類できる。

まず気体は、化学的に充分安定な分子からできていれば、容器以外には一応利用できる。原子

一個から分子ができている気体、たとえばヘリウム（He）やアルゴン（Ar）などであれば、分子の壊れようがなく、より好都合である。ヘリウムガスは非常によい熱伝導性をもっている（ただし、高圧ヘリウムを漏れないように閉じ込めるのは至難である）。

固体では、問題はいっそう複雑である。放射線照射で結晶的な構造が壊されるからである。その現象・振る舞いは複雑で、実際的な条件下で照射試験を行なってみないと、何が起こるかわからない。その試験実施および事後解析には、特殊施設と多大な能力・労力および経費を要する。このような照射損傷効果の他に、微量ではあっても核化学反応の結果として生成した元素類の影響や、その化学的後処理（除去など）が、固体ではきわめて困難である。こうしたことはほとんどすべて、固体が流動性をもたないことから生ずる。これは軽水炉の問題点（一）として指摘したことである。敢えて欠点のみを述べたが、もちろん固体の構造材料・容器材料なしに装置は造れない。

液体は両者の中間にある。液体には大きく、（ア）水、アンモニアなどの無機液体、（イ）アルコール、ベンゼン、PCBなどの有機液体、（ウ）液体金属、（エ）熔融塩、の四種類がある。（ア）と（イ）は、構成分子が高温では安定しにくいこと、また、照射損傷を受け、分子が分解したり重合したりして変質してしまうことなどが、まず問題となる。

（ウ）の液体金属は金属原子からなる液体なので、一般に壊れる分子はない。しかし化学反応性が強い。

（エ）の熔融塩とは「塩が熔融して液体になったもの」である。塩とは陽・陰二種のイオンの集合体だから、これはイオン性液体ともいわれる。最も知られている食塩（塩化ナトリウム、NaCl）は、融点の八〇〇度より高い温度では、ナトリウム陽イオン（Na^+）と塩素陰イオン（Cl^-）が同数ずつ混ざり合って、全体は安定な電気的中性を保ちつつ、激しい熱運動をしている単純なイオン性液体であり、放射線で破壊される要素は全くない。

したがって（ウ）（エ）が候補として適しているが、両者ともに容器材料の腐食に注意をしなければならない。なお、中でも最も有望な「熔融塩」については、第五章で詳しく説明する。

B　エネルギー変換の技術は？

A項で検討した材料を使って炉を設計する際、次は、発電炉としてはどのような方法で発電するのかの選択になる。原理的には、核分裂で生じた原子核や放射線粒子の一部がもつ電荷から直接発電したり、原子や素粒子の高速の運動量を電気に変えたりできるはずだが、こうした方法はまだ実用化されていない。そこで、核分裂で高温となった核燃料から、たとえばヘリウムガス・水・熔融塩などの冷却材（熱媒体）で熱を運び出し、その熱で水蒸気を発生させてタービン発電をするものとしよう。すなわち、旧式ではあるが、熱効率・経済性の点でまだ王座が揺るがない「水蒸気発電技術」を使うと決めて話を進めよう。

このように技術条件を狭めても、まだ、核燃料物質そのものに何を選ぶのか（後述するように、今の原発の燃料であるウラン235以外にも、核燃料物質となりうるものがある）、燃料体の形状・構成

をどうするか、冷却材に何を使うのか、などの課題がある。

さらに今ひとつ、核分裂炉の重要な構成材料として、「中性子減速材」のことを考えなければならない。

「中性子減速」とは何か

「中性子減速」というのは「臨界」を理解する上で大切な現象であり、核反応に独特な面白い振る舞いでもあるので、ぜひ解説しておきたい。

一九九九年の東海村のＪＣＯ臨界事故や、前章の天然核分裂炉の話からもおわかりのように、たとえ少量の核燃料でも、ある条件が整うときわめて容易に臨界状態になり、核分裂反応が連鎖連続的に始まり爆発状態になりうる。

ウラン235の核分裂で中性子が発生するが、その発生直後の中性子は、エネルギーの平均値が約二ＭｅＶである。これだけ高エネルギーだと、飛んで行くのもきわめて高速で、なかなか隣のウランには衝突しない。ところが、この中性子を何らかの手段で減速させて、充分に低速にする(こうしてエネルギーが落ち、常温物質中にある原子核と同程度のエネルギーになったものを「熱中性子」という)と、数十、数百倍も反応が容易になる。すなわち、遅い中性子から見ると、ウラン235の原子核が数十、数百倍の大きさの異常に巨大な怪物または壁となって立ちふさがり、容易に衝突・吸収され核分裂してしまうのである(この現象の理論的説明は難しい。いわば経験知だと思

っていただきたい）。その様子は図２－３（59頁）の右端に模式的に示しておいた。
理由はすぐ後で述べるが、中性子の減速には水や有機液体が最適である。したがって、そうした水や有機液体を使う再処理や燃料製造作業などが、いかに危険な作業であることか。手違いで、その減速効果から臨界状態を出現させた悲惨な重大事故が、過去に世界でしばしば起きていたのである。それを知らない技術者集団が、日本最高の核技術地域である東海村で二〇年間働いていたなど、だれも信じられることではない。東海村臨界事故の翌日、フランスの親友が早速聞いてきたのは「テロか？」だった。
それはさておき、中性子の減速で核分裂反応が容易に進むのは、好都合な話であるのみか、一般に臨界量、すなわち必要な核燃料も少なくてすむ、ということにつながる。したがって、一般の炉はほとんど減速材を使用するように設計してあり、「熱中性子炉」といわれる。
減速材には、なるべく「軽い原子核」で形成された物質が適している。中性子が重い原子核に当たれば、壁にぶち当たったのと同様に、ほぼ同じ速度で跳ね返されるが、相手が軽い原子核だと減速される。ビリヤードの玉が静止している玉と正面衝突すれば、当てられた玉は跳ね飛ばされ、走ってきた玉はほぼ速度ゼロになるのを思い出していただければよい。中性子とほとんど同じ重さのものは、水素原子核（陽子一個）である。したがって、水素を多く含む化合物が減速材によいということになるが、表３－２（次頁）を参考にしつつ考えると、水素はかなり中性子と反応してそれを吸収してしまうので、次に軽くて中性子と反応しにくい重水素（陽子・中性子と

表3-2　熱中性子吸収断面積の小さい元素または同位体の順位表

順位	元素（天然存在比）	断面積（ミリバーン）＊
1	${}_{8}\mathrm{O}$ ［酸素］	0.19
2	${}^{2}_{1}\mathrm{H}$(D) ［重水素］（0.0148%）	0.519（${}_{1}\mathrm{H}$　332.6）
○ 3	${}_{6}\mathrm{C}$ ［炭素］	3.53
4	${}^{11}_{5}\mathrm{B}$ ［ボロン］（80.0%）	5.5（${}_{5}\mathrm{B}$ 767,000）
5	${}_{2}\mathrm{He}$ ［ヘリウム］	6.9
○ 6	${}_{4}\mathrm{Be}$ ［ベリリウム］	7.6
○ 7	${}_{9}\mathrm{F}$ ［フッ素］	9.6
8	${}_{83}\mathrm{Bi}$ ［ビスマス］	33.8
9	${}_{10}\mathrm{Ne}$ ［ネオン］	39
○10	${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$ ［リチウム］（92.5%）	45.4（${}_{3}\mathrm{Li}$ 70,500）
11	${}_{12}\mathrm{Mg}$［マグネシウム］	63
12	${}_{14}\mathrm{Si}$ ［シリコン］	171
13	${}_{82}\mathrm{Pb}$［鉛］	171
14	${}_{15}\mathrm{P}$ ［リン］	172
15	${}_{40}\mathrm{Zr}$［ジルコニウム］	185
16	${}_{13}\mathrm{Al}$［アルミニウム］	231
17	${}_{1}\mathrm{H}$ ［水素］	332.6
67	${}_{17}\mathrm{Cl}$［塩素］	33500
18	${}_{37}\mathrm{Rb}$ ［ルビジウム］	350
19	${}_{20}\mathrm{Ca}$ ［カルシウム］	430
20	${}_{16}\mathrm{S}$ ［イオウ］	530
21	${}_{11}\mathrm{Na}$ ［ナトリウム］	530
22	${}_{50}\mathrm{Sn}$ ［スズ］	626
23	${}_{58}\mathrm{Ce}$ ［セリウム］	630
24	${}_{18}\mathrm{Ar}$ ［アルゴン］	675

元素記号の前左下の数字は原子番号、前左上は核の質量数
○は本書提案の熔融塩炉の主要構成元素
＊バーンは断面積の単位で$10^{-28}\mathrm{m}^2$

もに一個ずつの水素）、ヘリウム、ベリリウム、炭素などを含む物質もよいということになる。こうしたことから、水、有機物、重水（水素ではなく重水素からなる水）、黒鉛（ほぼ炭素のみからなる）などが、実用的減速材として注目される。

　核エネルギーを利用する炉では、主役は「中性子」である。核分裂で生まれたこの貴重な中性子を、もっぱら次の核分裂を起こさせるのと、親物質（ウラン238やトリウム232）に吸収させ核燃料を再生することにのみ役立たせ、できるだけ、無駄に制御棒や炉構成材料に食わせたり、

炉外に漏らしたりしないのが、「良い炉を造る秘訣」である。
無駄にした中性子は、邪魔で始末に困る放射性（廃棄）物質作りに回るわけで、反応効率の低下と廃棄物処理の負担との、二重の損になるのである。
なお、制御棒に中性子を食わせて核反応をコントロールしていることは、すでに述べた。これからすると、制御棒に食わせる分の中性子の無駄はやむをえないかに思えるが、実はそうではない。なぜなら、その工夫が必要なのは固体核燃料炉だからである。本書で提案する炉では、制御棒はほとんど必要とせず、すべてで中性子を大事にする。このことは第七章で解説する。

C　化学処理をどう進めるか？

炉は核化学反応装置であり、化学プラントである。いくら少量でも燃料の原子核が変化し、別の物質になってしまうのだから、そうした生成物質を核反応の邪魔にならないよう化学的に処理しなければ、燃料は劣化し、反応効率は低下する。このことは、原潜炉開発のような「どさくさ仕事」の時代はいざ知らず、民間実用炉開発時代にはもっと認識すべき問題だった。しかし、何ぶんにも核燃料の消費量が、発生熱量当たりで化石燃料の一〇〇万分の一に過ぎないので、とりあえず核燃料棒を電気発熱体であるかのように取り扱う「電気機械的装置」として設計し、ごまかしてきてしまったのである。
燃料棒を化学処理するには、交換時に炉心から引き出し、再処理工場に持ち込まなければならないが、そのためには一時、炉を停止しなければならず、プルトニウムその他の危険な放射性物

質を必要以上に炉外で取り扱わざるをえず、面倒な再処理工程を経なければならず、と、きわめて非効率かつ危険な作業を強いられる。第二次世界大戦中にすでに物理学者ユーゲン・ウィグナーが指摘した（第九章参照）ように、化学プラントであることを認識していれば、後述するような高効率かつ安全な別のやり方が選べたはずである。まことに情けない話だが、今からでも遅くない。反省して、化学プラントの基本的性格に適した設計思想で材料の選択を行ない、「良い原発炉」を開発すべきである。

また、原発という化学プラント本体の運転・保守および燃料処理を考えたのみでは、「良い原発炉」としてまだ落第である。

いうまでもなく、燃料の採取から輸送、廃棄物処理まで、炉を取り巻くすべてを包括する「核燃料サイクルシステム」全体を、最適なもの、すなわち最も単純で、合理的・経済的なものにすべきである。それには用地、建物、人員、輸送路・量、廃棄物量等や、さらにそれらすべてに関わる作業量を最小にすることである。以上の自明な事項に加えて、社会へおよぼす悪影響を最小に抑え、さらにできれば、間接的にでも社会への貢献が電力供給以外にも期待できるような新エネルギー産業の開発を目指すべきである。

少なくとも、核産業は規制・監視の厳しい管理社会を生む、といった定説を覆すことくらいは、目標としてほしい。これらのことは第九章の表9－2（202～204頁）でも取り上げる。

平和利用はガス冷却炉から始まった

ここで、熱中性子発電炉の産業開発史を簡潔に要約しておきたい。

まず手がけやすかったのは、

冷却材はガス――減速材は黒鉛――燃料は天然ウランの組み合わせだった。ガスは高圧になるが、液体と同じように流動性をもつ上に、液体が気体に変わるような状態変化がなく、取り扱いやすい。中でも炭酸ガス（CO_2）は熱容量の大きい良い熱媒体である。黒鉛減速材は容易に純粋なものが得られ、中性子と反応しにくい（88頁表3－2）のみならず、高融点（約四〇〇〇度）・高熱容量・高熱伝導度・高強度であり、放射線損傷を受けにくく、高温材料として特に優れる。この組み合わせで天然ウランのままで臨界にできるのなら、ウランの濃縮を要しないので、炉として大きな利点となる。

それでこの実用化に、苦しいエネルギー資源・社会経済状況にあった戦後の英国が、国運を、そして技術先進国の名誉をかけて取り組んだ。その成果を日本も東海一号炉として輸入し、優れた運転実績を残したが、炉体積がかさばり不経済で、高温では黒鉛が炭酸ガスと反応するのであまり温度を上げられないため、発電効率が低く、今はない。

高温ガス炉の将来性

なお、高温ガス炉の開発は、その後、ガス冷却材としてより優れたヘリウムを利用することで、

日本も含めた各国で永らく続けられているが、この方式には致命的な欠点があった。それは、核燃料体として、核物質の酸化物または炭化物の微粒子（約一ミリメートル径）を緻密な炭素層・炭化シリコン層などで多重に覆い、それを数センチの黒鉛球（ペブル）または黒鉛ブロックに埋めこんだものが使われていて、そのためにこの核燃料体の製造費が高いこと、また、炉心の発熱密度が低く、したがって発電量当たりの炉心体積が大きくなり、どうしても炉容器が大きくならざるをえないこと、さらには、発電用の高圧水蒸気が炉心に浸入することに対する安全対策を講じなければならないことなどから、発電コストが高くなりがちであった。

そうした手詰まりな情況の中、近年になって、同じ高温ガス炉ではあるが、安全かつ経済的な動力炉に変えうるものとして、次の二つの改良策が示されている。

ひとつは、（a）発電を止めてしまい、一〇〇〇度くらいの高温を直接工業熱に利用する方策（例えば燃料電池用の水素の製造に利用するなど）である。核反応で発生する熱を一旦電気に変えるよりは、熱というエネルギー形態のまま直接工業利用するほうがエネルギー損失が少ない、という考え方である。西独が始めたが、現在は日本原子力研究開発機構（旧・日本原子力研究所）が最も積極的に推進している。

今ひとつは、（b）ヘリウムガスで直接タービン発電させたりすることで経済性を高めうる「ガスタービン小型高温ガス炉」という方式である。これは私も親しかった米国ＭＩＴ（マサチューセッツ工科大学）の故リッツキー教授らが提唱し、脚光を浴びてきている方式である。炉を小

型に留めておけば、ヘリウムガスの冷却機能が失われても自然放熱で冷却ができ、あまり高温にならない燃料被覆層によって核分裂生成ガスの放出も防止できて、安全性を高めうることなども、評価されている。

しかし、実はこれらにも難点がある。まず、（a）についていうと、熱の直接利用自体に限界がある。直接利用は電気に変換しないから一見高効率に思えるが、炉と熱利用の工場が充分近接しなければならず、利用上の制約がきわめて大きい。輸送ができ遠隔地で何にでも使える電気というエネルギー形態のほうが、はるかに使い勝手がよく、発電は止めるべきではない（なお、本書の後半で提案する熔融塩炉では発電の他、工業への熱の効率的な直接利用もできるが、その方式では高温ガス炉の〔a〕よりも開発項目が少なく効率的であろう〔第七章参照〕）。

また、（b）の方式についていえば、一〇万キロワット級の高出力のガスタービン発電機自体が実証されていないのである。ヘリウムガスの取扱いはきわめて難しく、このことがタービンの開発および経済性を圧迫している（ヘリウムは容器からのガス漏れ検出用に利用しているくらいであって、容器内に閉じ込めておくのは至難で、漏洩損失は無視できない）。また、装置が物理的な破壊を受けても、充分に安全か疑問な点もある。さらには、この特殊で堅固な燃料体の製作コスト高は依然問題である。また、堅固なのと炭素の放射能によって化学再処理は困難となるから、燃料体は使い捨てであって、核燃料サイクルの構成が不可能になるという点もある。後述するように、二一世紀には燃料を循環・再利用する健全かつ大規模な核燃料サイクルが必須だから、特に

この最後の点は、この方式を支持できない大きな理由となる。

ともあれ、現実には（a）（b）ともに基本設計は予定より遅れてきている。これらは「発電炉は化学プラントであるべき」という基本思想に反しているから、今後も設計上の矛盾が拡大するだろう。現に、大宣伝をしつつ十数年開発を続けてきた南アフリカの「ヘリウムガスタービン・ペブルベッド炉」は二〇一〇年、遂に会社を解散した。技術困難と経済性での破綻であろう。これから開発する原発は、単純で容易に世界に展開できるものでなければならないのである。

重水炉・軽水炉

ガス炉を追っかけた他の炉型は、次の組み合わせのものである。

冷却材は重水または軽水——減速材は重水または黒鉛——燃料は天然ウラン

この方式の利点は次のようなものである。軽水（いわゆる普通の水H_2O）は、水素が中性子をよく吸収して重水（水素が重水素Dと置き換わった水）となるので、軽水を減速材にする炉では、どうしてもその重水への変化が起こって反応効率が落ちる。しかし、軽水の代わりに重水を減速材にすれば、重水は中性子をほとんど吸収しないので中性子利用の効率が上がり、天然ウランで臨界にできるようになるのである。この方式はカナダが、水力発電を利用した水電解工業での副産物として安価で膨大な重水ができる点を生かし、いち早く実用化に成功した（現在は硫化水素法により重水を得ている）。カナダのみでなくインド・韓国その他多くの国で今でも実用化されて

いる。この「重水炉」系統の炉では、さまざまな材料の組み合わせが可能であり、この方式は低濃縮ウラン（三〜五パーセント）を使用するものにもつながってゆく。

実は、世界で最初に発電に成功した方式は、ソ連最初の秘密原子力都市オブニンスクでクルチャトフ博士が完成させた、次のような組み合わせの炉だった。

冷却材は軽水——減速材は黒鉛——燃料は低濃縮（五パーセント）ウラン合金

その後、旧ソ連圏の炉は、ほとんどこの系統を改善したものが中心になっている。

そして、今世界で最も広く使われているのは、より単純な、

冷却材と減速材は軽水——燃料は低濃縮（三〜五パーセント）ウラン（ほとんど酸化物）

の組み合わせによる軽水減速・軽水冷却発電炉である。日本も含め世界の原発の約八〇パーセントがこの炉型である。この軽水炉は、すでに述べたように、元来米国が原潜用に開発したものを民需用に回し、初期には高度の経済性が大評判となった。導入競争に遅れては社運に関わると、米国特有の多数の群小発電会社が先を争ってこれを導入し、一〇年間ほどで約一〇〇基が建設された。それを聞いて日本も導入を急いだ。

それくらいだから、かなり良い炉というべきである。初期には他の種々の炉型開発に熱心であったフランスも、最終的、後発的に（したがって、他国の失敗をよく咀嚼（そしゃく）した上で）一気に標準規格化して、五十数基の加圧水型軽水炉を全国に展開し、国内電力の八〇パーセントを供給するだけでなく、近隣諸国にも電力を輸出している。スイスなどは、国内では原発廃止を謳いつつ、フ

ランスの原発に国費を投資している。
しかし、本章の初めで解説したように、時を経た今となっては、理想から遠い炉型であるといわざるをえない。まだこれから全世界で、三〇年から五〇年は使用せざるをえないのが現実だが、問題にすべきは安全性の改善、そして廃棄物・プルトニウム核拡散問題である。このことの抜本的解決なしに未来はないが、それらについては次章で考えたい。

高速増殖炉は未来を支えるか?

以上では、もっぱら熱中性子炉（中性子を減速して利用する炉）を考えてきたが、これと全く別の考えの炉型がある。それは「高速（中性子）炉」または「高速増殖炉」といわれるもので、核分裂中性子を減速せずに使用する。日本では一九九五年、ナトリウム漏れ事故を起こした原型炉「もんじゅ」が、これに当たる。
核分裂で発生する中性子の数は約二・三で二より多い（59頁図2-3参照）から、一個を核分裂連鎖反応の維持に使い、一個を核分裂させて消えた核燃料の再生補充に使っても、まだ残りの中性子によって余分の核燃料を増殖できる可能性がある（138、139頁図6-2参照）。高速炉には減速材がないからそこに吸収される中性子が減り、核分裂で発生する中性子数を有効に生かせるので、それだけ核燃料の増殖に中性子を回せることになる。
ただし、液体金属ナトリウムなどを冷却材として使用する（これらは減速能力がなく熱除去能

力は高い）こととなり、炉の設計や技術開発、経済性確保が難しくなる。日本でも約五〇年前にその開発を国家計画とし、私も液体金属ナトリウム冷却材技術の基礎固めを担当したが、今では巨費を投じて開発を続けているのは日本とロシアくらいである。中国・インドが壮大な計画を提示しているが、実態は未熟である。

高速増殖炉には次の四つの問題点がある。

（一）世界の主力エネルギー源となるまで育つには、増殖成長速度が遅過ぎる――これについては、なぜ増殖が必要なのかの解説も含め、第八章で論じよう。

（二）安全性が不充分――熱中性子炉よりも技術的に無理な設計が要求される。

（三）プルトニウムの大々的利用が問題――増殖される核燃料はプルトニウムである。高速炉が温暖化を防ぐ効果的環境対策にもなるには、大規模な利用が求められるが、それには数万トンのプルトニウムが必要である。その核拡散・核テロ対策が大問題となる。

（四）経済性が問題――核燃料再処理、核廃棄物処理などが高くつく。四〇年前までは、原発の発電コストは一般に、もっと余裕がある、もっと技術改良などで下げうる、と考えられていたが、今そう楽観視する関係者はいないだろう。まして、この高速炉の経済性の悪さは問題である。なお、いまだにウラン資源がなくなるから高速炉での増殖が必要だ、などと言う人がいるが、ウランは資源国による寡占状態ではあるものの、決して「有限」なのではない。

この高速増殖炉の開発は、すべての主要大国で五〇年間、膨大な投資がなされた上で断念され

たことを忘れないでいただきたい。あれだけ強弁を続けてきた日本政府でさえ、ついに二〇〇〇年八月に開発年次計画を改変し、二〇五〇年までに実用化させるという。たしかに、今後何十年か投資を続ければ何かは生まれるだろう。何かに役立つこと（たとえば宇宙開発への利用）を否定はしない。しかし、その間に日本や世界はどうなるのか、考えているのであろうか。四〇年先の話というのでは、俺がやるというリーダーの顔が見えない。

以上、本章で取り上げた炉型では、すべて「固体の核燃料」を使用している。現に、世界で運転されている原発四四三基（二〇一〇年現在）はすべて固体核燃料炉である。ここまで折に触れ、固体燃料は多くの技術的問題をかかえていることを説明してきたが、そのことは第五章で再論しよう。

第四章 「安全な原発」となる条件

これからの原発は、まず社会に対する信用回復から取り組まなければならない。チェルノブイリや福島のような重大事故を起こさない安全な原発を造るには、具体的にどうしたらよいかを示す。

安全で社会的に受け容れられる炉とは？

前章で触れた軽水炉型原発などで、最も問題にすべきは安全性である。商品は安全でなければ、信用し安心して使えない。何度もいうように、現在運転中の日本の原発が、すぐ運転を停止すべきであるほど危険なわけではないが、現状でいいわけはない。ここでの命題は「本質的に安全な炉」は何か、ということである。

一九九一年に美浜原発事故が起こってから、日本政府は日本の原発でも重大（苛酷）事故が起こりうることをようやく認めた。それまであくまで否定していたのを正直に言ったのはよいが、なぜそれまで隠していたかの本質的反省が全くない。また「起こりうる」のでは困る。そのような「逃げ腰体質」がこのたびの福島の大惨事をもたらしたのは明白である。

我々は、本書で紹介する「熔融塩炉」が原理的に重大事故を起こさないものであることを強く主張し続けてきた。専門家たちもその安全性を認めていたのであるから、国や原子力業界がこれまで一顧だにしてこなかったことには憤りを感じる。

ここでは、既存の原発の安全性についての一般的な問題点を整理しておきたい。

すでに事故報道などで耳にされているかもしれないが、安全を守る要諦は、

（A）炉を確実に停止すること
（B）停止後も核物質から崩壊熱を除去すること
（C）放射性物質の外部放出を防止すること

の三項である。

(A)炉を確実に停止するのは、一般にそれほど難しいことではない。どの炉でも最優先で配慮してあるからである。事実、少なくとも福島でも、一応停止には成功しているようである。

(B)炉の核分裂連鎖反応を停止できても、その後、核燃料内に生成されている核物質からの放射能改変による崩壊熱を除去し続けなければならない。その熱量は、停止するまでにどのような燃料物質をどれだけ燃焼したかで変わってくる。したがって一概に予測はできないが、傾向を類推してもらうために、一例として一一〇万キロワット発電の加圧水冷却炉の場合を示しておこう(なお、崩壊熱は炉型には関係しない)。

直後はまだ二二万キロワットの熱を出す。一日後は一・七万、五日後は一万、一五日後は五六〇〇、一ヵ月後は四〇〇〇、二ヵ月後は二三五〇、四ヵ月後は一七四〇と減るが、一年後で六六〇、三年後でも二〇〇キロワットの熱を出し続ける。冷却放熱が不充分であると、いつでも容易に超高温になってしまうのである。

冷却作業が大変な負担であることが、この数字からよくわかる。ご存じのように、これが津波などで予想外に全電源を失った福島第一原発事故の主原因である。明らかに「非常電源確保」にもっと積極的であるべきだった。

(C)放射性物質の外部放出防止は至上命令である。しかし、これも福島では防げなかった。福島の事故を招いた根源は、明白である。「技術の原理」ではなく、「多重防護という無理筋対

応」を過信したからである。

以下、もう少し一般的・基本的な炉の安全性を考える上での主要ポイントを列記しておく（なお、我々の推奨する「熔融塩炉」の安全性は、第七章で取り上げる）。

一般に炉は、臨界より少し上の核反応状態を維持するように制御されている。そして、少し反応が強まり過ぎると、自己制御がきくように設計されている。たとえば、反応が強まり高温になると、逆に反応を弱めて低温に戻ろうとする。それでも制御が間に合わない場合は、中性子を強く吸収する物質でできた制御棒を、炉心に押し込んで核反応を弱める。

それでもなお制御できないと、核反応が急速に増大し、たとえば炉内部が高圧になって、ついに容器などが破壊されて冷却材が失われ、高温になって燃料体が熔融する事態が引き起こされることも考えられる。そうして炉心が熔融すると、核物質が一ヵ所に集まって、より激しい核反応を起こす可能性も出てくる。

したがって、このようなことが、どのような装置故障が重なっても発生しないように、炉を設計すべきである。故障・破損の原因としては、材料の疲労や化学腐食などだけでなく、放射線照射による損傷も考えられるので、炉概念設計の段階で、破損が起きにくい材料・形状構造を選び、さらには、いかなる事故が起きても重大事態へと発展させない設計思想を確立すべきである（後章で述べる熔融塩炉であれば、福島やチェルノブイリのような重大な事故は決して起こさない設計にできる）。

また、事故時のみならず、故障がないときでも、炉から放射線が少しは漏れる可能性があるが、その際の放射線被曝が法的規制値を上回ることがあってはならないし、漏れた放射性物質の汚染・吸引による人体被曝や化学的傷害も防止しなければならない。作業員以外の一般公衆に対しては、より厳重な防護措置が必要である。

なお、最近、ロシアのクルチャトフ研究所で開発された、シリコン高分子を使った放射性物質放散防止用の白色の被覆（コーティング）材「ＥＫＯＲ」は、無毒で耐火・耐熱性にきわめて優れており、対象物質の表面が濡れていても乾いていても汚れていても、被覆材として極めて優れた能力を発揮することが証明されたという。このＥＫＯＲの製造と販売の権利は、ワシントンに本拠を置く米ユーロテック社が獲得した。

核物質・核廃棄物は炉外でも取り扱われ、遠距離輸送されたり、保管・貯蔵されたりするが、それらすべての作業においてきちんとした管理体制が整えられないと、事故の原因となる。また、核拡散・核テロ対策上の安全保障措置も義務づけられる。それらを炉から出し入れして取り扱ったり、輸送したりする量と頻度を、できるだけ減らすような燃料サイクルの設計も工夫すべきである。

核施設や核物質に対する謀略的なテロ行為や、内部破壊活動（これはサボタージュと呼ばれる）は、実災害以上に社会的パニックを引き起こす可能性があるので、特別の防護措置が必要であり、被害が拡大しないような炉設計上の本質的工夫も求められる。また、時代とともに、そうした事

件を起こす心理的誘惑が強まりつつあるとも考えられるので、その可能性を今まで以上に公開し、起きうる事態への適切な認識・対応能力を高めるべきである。
さらに重要なのは、そのような行為を誘引する対象物をできるだけ排除もしくは低減させることである。その最大の存在はプルトニウムである。

プルトニウムの発ガン性

万一体内に摂取されると、プルトニウムはアルファ放射性元素として高い毒性（発ガン性）を示す可能性がある。プルトニウムは水に溶けにくいので、経口摂取してもほとんど体外に排泄され、発ガン効果は小さいとされているが、空中の微細浮遊物として吸入摂取された場合には、その一部が、肺や、肺から血液を介して移行した肝臓や骨格に長時間留まる。その結果、近傍の組織細胞がアルファ線で照射され、通常十数年以上経過後に、晩発効果としてガンが発生する可能性がある。
同じアルファ放射体であるウラン235や238よりもプルトニウムが危険とされるのは、その比放射能（単位質量当たりの放射能の強さ）がきわめて高いからである。プルトニウム239のアルファ線の比放射能は、ウラン238の約一九万倍、ウラン235の約三万倍、ウラン233の約七倍、トリウム232の約五〇〇万倍である。
こうした発ガン性以外に、猛毒の化学物質として取り沙汰されたこともあるが、それは誤解で

ある。発ガン性以外の一般的な意味での化学的毒性は、これまでの症例（少数しかないが）からは、他の重金属とそう変わらないとされている。

このことから、テロリストが脅迫のためにプルトニウムの散布を試みても、その効果はほとんどないと主張する人もいる。しかし、たとえその毒性が吸入による晩発の発ガン性に限られたとしても、テロリストは不安を拡大させるのが目的なので、散布の方法や量などを明らかにするはずはない。プルトニウムは、ガンマ放射能が弱くて検知が困難な上に運搬も容易であるから、人を恐怖に陥れる効果はきわめて高いと見るべきだろう。

発電所は公共施設

核エネルギー発電システムが、広く社会に受け容れられる充分に安全なものとなるには、少なくとも、以上指摘した諸要素で合格しなければならない。現在の軽水原発は、過去の実績から見て、いっそうの改良が求められている。

もう一点、補足しておきたい。

発電所は公共施設であり、特殊目的の工場ではない。いうなれば水道施設のように、町役場などで単純に管理できるようなものでなければならない。

しかし、原発の実態はそれからあまりにかけ離れ、みな人里離れた僻地の砦のような存在である。逃げる（？）から疑心が追いかけてゆくのである。当事者側も市民側も、この矛盾をまず抜

本的に改善すべきだ、とは認識していないようである。それどころか、たとえば某電力中央研究所員などは、大学向けの教科書の序文で「なぜ都会近郊に置かないのかとよく聞かれるが、地価の高い所に置けますかと答えると、みなわかってくれる」と述べるような始末である。青森から四〇〇キロメートル離れた東京まで送電すると、電力コストは二〜三倍になる。安全性の説得がわずらわしいからであるのをごまかす、二重、三重の詭弁(きべん)である。

「未臨界加速器炉」という提案

やや専門的な話になるが、核エネルギー関係者の間で、時に、より安全な炉として「未臨界加速器炉」というものが話題になることがある。これは欧州高エネルギー研究所の所長だったカルロ・ルビアが一九九三年に主張し始めたもので、彼がノーベル賞受賞者だったことも寄与して有名になった。一〇〇〇から三〇〇〇MeVくらいに水素原子核(陽子)を加速して重い原子核に衝突させると、その重い原子核から多量の中性子が放出される。ルビアは、この反応(「核スポレーション反応」という)で得られる中性子で有用核物質の生産や核分裂を行なわせ、発電もさせようというのである。

詳しい説明は省略するが、ルビアの提案は、結局は持続的でない核分裂(つまり未臨界)でエネルギーを得よう、というものである。しかし核スポレーション反応では、中性子は豊富に発生するが、エネルギーは充分には得られない(左頁表4-1参照)。ルビアの意図は、社会一般で

表4-1　エネルギー利用上で主要な核反応の特徴

核反応	エネルギーの入手	中性子の入手
DT核融合	容易でない	容　易
核分裂	容　易	容易でない
核スポレーション	困　難	充分に容易

核分裂連鎖反応炉（原発）があまりに評判が悪いので、その安全性を改善しようという点にあるが、そうした加速器を加えた複雑な装置で、安定した運転性と経済性を求められる公共発電所が造れるわけがない。後述するように、そんな複雑な発電炉を造らなくても、持続的な核分裂（臨界状態）を利用して、充分に安全な原発はできるのである。

ただし、この核スポレーション反応自体は、中性子が豊富に入手できるきわめて有用なものである。この反応の利用研究には五〇年以上の歴史がある。私も三〇年以上前から、発電炉ではない利用を積極的に考えている。

結局、核エネルギー利用において役立つ主要な核反応は、核分裂・DT核融合・核スポレーション反応の三種である。それらの主要特性の比較を、表4－1に示した。

核スポレーション反応は、中性子入手に特に優れ、エネルギー入手は得手でない。核融合は、エネルギー入手にはそれほど有利ではないが、中性子入手は核分裂より優る。我々の目的はエネルギー入手だが、これに対しては核分裂が圧倒的に有利である。ただし、中性子の入手は充分でない。

中性子が豊富に入手できるほど、核反応の効率はよく、核燃料の再生産増殖にも有利であり、一方、エネルギーが豊富に入手できるほど、そのエ

ネルギーをより多く電力に変換できて、発電所として有利である。したがって、核分裂のエネルギー入手の決定的優位性を生かしつつ、弱点の中性子不足を核スポレーション反応で補おうというのが、本書で提起したい戦略である。このことは、なぜ核燃料の増殖が必要なのかの説明も含めて、第八章で詳しく解説しよう。

第五章　「原発」革命　その一——固体から液体へ

「良い原発」を造るには、過去・現在の原発がみな使っている固体核燃料を液体核燃料に替えなければならない。
種々の液体の中では「熔融塩」というものが圧倒的に有望である。

なぜ液体がいいのか

第三章で説明したように、核エネルギー炉は「化学プラント」である。したがって、その主要反応物質と媒体（合わせたものがいわゆる核燃料である）は、液体であるのが望ましい。理由を示そう。

気体は、液体や固体に比べ、常圧で一〇〇〇倍の体積をもつので、少々加圧しても隙間だらけで、分子同士や中性子などがなかなか衝突せず、反応が進みにくい。また、高圧にして圧縮してもまだ大容量で、耐圧容器の製作費が膨大となり、経済性が低下する。

一方固体では、核反応や放射線の影響で変質・破損・熔融して、事故原因となることが多く、熱除去には、別に冷却媒体が必要となる。燃料管理や、核分裂反応生成物の除去などの化学処理でも、固体には困難が多い。

その点液体であれば、今述べた技術的難点のほとんどが解消できる。そして、決定的に安全性が向上する。これから縷々説明を加えるが、必要なのは、適切な温度領域で充分安定な熱媒体となることができ、熱中性子の吸収が少なく（88頁表3－2参照）、あまり放射線損傷を受けず、核分裂を進めるのに必要な核物質濃度（密度）を安定的に確保できる、そうした有用な液体の選定である。

液体核燃料の長所と欠点

一九四二年という原発開発史上のきわめて初期より、さまざまな液体が対象として取り上げられ、当時可能な最高度の研究が進められた。国家による大規模な研究投資が行なわれ、種々の「特異な液体技術」の基礎データが蓄積されたのである。そこから生まれた液体核燃料炉構想の大部分は、実用化を阻む諸要因が発見されて挫折したが、研究成果自体は今後の創造的高度技術開発のための宝庫といってよい。核関係以外の領域でも大いに役立てたいものである。

固体核燃料に比べての一般的特長は、まず炉心構造が単純になることである。燃料体の製作・輸送・炉への装荷・差し換え・放射能冷却・再輸送・再処理・再生製造等々といった作業の大部分がなくなる。液体なら、燃料はポンプで遠隔操作でき、濃度調整も容易である。したがって、炉の全体構造や運転・保守作業全般も単純になり、建設費・諸経費が大きく改善できる。

核分裂で多量に生成されるクリプトン（Kr）・キセノン（Xe）などの放射性不活性ガス（ヘリウム〔He〕やアルゴン〔Ar〕の仲間で化学的反応力はない）は、核燃料液中に留まらず、液面を覆っているヘリウムガス相に容易に出てくるので、常時除去できる。その結果、固体燃料棒で見られたような、それらによる異常に大きい中性子吸収損失をまぬがれ、核燃料の再生能力が向上する。現在の軽水炉などでは再生率が一般に五〇パーセントであるのが、液体燃料炉ではこの除去効果で一〇〇パーセントになりうる。また、除去され炉内に残らないので、事故時にそれらのガスが環境へ放出され、災害となる可能性がほとんどなくなる。

しかし、欠点となりうる事項もいくつかある。まず、核燃料液体の濃度の変化で反応が変動し、

不安定になるかもしれない。炉容器外に核燃料を循環させる設計の場合は、核分裂直後ではなく少し遅れて出てくる中性子（遅発中性子）の一部が、炉外を燃料が循環している際に無駄に放出され、核燃料再生上の損失になる可能性がある。また、核燃料の全量を、炉外を循環する分だけ増やさなければならないかもしれないし、その循環一次系ループの配管・機器類の内壁に、さまざまな放射性物質が沈着するかもしれない。したがって、これらの悪影響が大きくならないような設計上の配慮が重要である。

特に重要なのは、核燃料液体による容器壁材料の腐食である。また、一般に液体は炉心の高温部と熱交換器の低温部の間を循環するので、高温部と低温部での材料金属のわずかな溶解度の差が効いて、腐食が加速される。実は大部分の核燃料液体は、この腐食問題が解決できずに敗退したのである。

腐食を除くこれらの欠点は、直感的に想像するよりも解決が容易な場合が多く、総合的には長所が欠点を補って余りある。

「熔融塩」とは何か

液体核燃料炉の中で唯一成功しつつあるのが、熔融塩核燃料炉である。「熔融塩」が高温での優れた熱媒体・化学反応媒体であることはよく知られていたので、炉開発の早い段階から、その利用研究は幅広く始まっていた。この利用が本書の主題のひとつだから、熔融塩とはどういうも

のかの解説から始めたい。

塩（えん）というと一般の人は、まず食塩（塩化ナトリウムNaCl）を思い浮かべるだろうが、後述するように塩は食塩以外にもたくさんある。我々が日常目にする食塩は固体だが、こうした食塩などの塩が「高温で熔融して液体になったもの」が熔融塩である。普通の家庭の調理器では、いくら食塩を高温にしても熔融はできない。しかし、陶器を焼くような八〇〇度以上の高温にすると、薄桃色（熔融塩自身は無色）のさらさらとした透明な液体になる。もちろん、温度を下げれば元に戻り、全く変質しない。

食塩の結晶は、ナトリウム陽イオン（Na^+）と塩素陰イオン（Cl^-）が、図5-1（118頁）に示したように、規則正しく交互に並ぶ構造をしていて、これを「イオン性結晶」という。これが高温になり熔融すると、各イオンがばらばらに運動を始め、液体になる。イオンでできた液体だから「イオン性液体」といってよい。一般に液体になっても、体積は固体のときと比べ一〇〜二〇パーセント膨張する程度だが、性質は大きく変化する。

一般のガラスも、さまざまな金属酸化物を主成分とする熔融塩の一種で、加熱すると、食塩の場合より低温で粘性の高い液体になる。ガラスと同類ではあるがもっと不純物が混ざっているのが熔岩で、これは珪酸（けいさん）（シリコン酸化物）を主成分とする熔融珪酸塩である。これと類似の熔融塩は鉱滓（こうさい）（スラグ）と称され、鉄や銅の精錬用熔鉱炉でも利用されている。たとえば、鉄の酸化物鉱石を炭素で還元して得られた粗鋼から、不要有害な不純元素をこのスラグに抽出させて、よ

り純粋な鉄鋼を作るのである。

核燃料としての研究

このように熔融塩にもさまざまな種類があるが、核燃料に使う候補としてまず考えられるのは、塩素（Cl、原子番号一七）を含む塩化物熔融塩である。しかし、表3－2（88頁）からわかるように、塩素は熱中性子の吸収が大きく、炉内であまり好ましいものではない。しかも、塩の大部分を占める塩素原子核が重い（質量三五・五）ので、減速能力がなくて熱中性子炉に向かない。それで、高速炉としての設計研究が少し試みられたが、一般的に、後に述べるフッ素を含むフッ化物塩より化学的性質が複雑で取り扱いが困難であり、その他の性質でもより良い理由がほとんどなく、研究対象から外れた。

また、硝酸塩・硫酸塩・炭酸塩・燐酸塩などや、水素を含み減速材を兼ねられるリチウムやナトリウム金属の水酸化物などが研究対象となり、予備実験もなされたが、高温での容器材料の腐食問題でみな不利であった。

こうした中で、成果を上げた熔融塩がある。米国のオークリッジ国立研究所（ORNL）の化学者たちは、一九四七年頃から特に金属フッ化物熔融塩に注目し、その技術開発や炉の設計研究を進めていたが、一九五〇年に飛躍の機会を得た。

オークリッジ研は、第二次世界大戦後早くからジェット爆撃機推進用の超高温炉の開発に加わ

っていて、当時すでに実験炉の製作を半分終えていた。これはナトリウム冷却・酸化ベリリウム減速・酸化ウラン固体燃料炉だったが、最終段階になって炉温度係数が正、すなわち温度が上がると核反応が激しくなる危険な炉であることが判明し、その対策に急遽、このフッ化物熔融塩燃料構想が採用されたのである。

この最初の熔融塩実験炉はARE（航空機実験炉）といわれ、二五〇〇キロワットの出力で一九五四年一一月に安定した運転に成功した。これは熔融塩炉として最初の挑戦であり、わずか一〇日間の運転だったが、達成された燃料温度は八六〇度という驚異的な高温であり、炉の運転制御挙動は充分に満足できるものだった。この成功で熔融塩炉の開発は、確固たる基盤をもって前進を始めることとなった。

フッ化物熔融塩という選択

このAREで使われた熔融塩核燃料は、フッ化ナトリウム（NaF）とフッ化ジルコニウム（ZrF_4）という二つの塩を混ぜた二元系熔融塩を溶媒とし、それにフッ化ウランを溶かしたものだったが、その後の研究で、最終的に民間原発用としては、フッ化リチウム（LiF）とフッ化ベリリウム（BeF_2）の二元系熔融塩を溶媒とするのが最適とされた。表3-2（88頁）からわかるように、この熔融塩溶媒を構成するフッ素（F、原子番号九）・リチウム（Li、同三）・ベリリウム（Be、同四）は、最高度に熱中性子吸収が少ないだけでなく、原子量も小さくて（フッ素の質

量は一九、リチウムは七、ベリリウムは九)、減速材の補助にもなるからである。

なお、リチウムを核燃料に利用する場合は、天然に得られるものをそのまま使うのではなく、存在比が九二・五パーセントの質量数七の同位体(リチウム7)のみを分離して使う。なぜなら、表3-2に示したように、リチウム6(存在比七・五パーセント)が非常によく熱中性子を吸収し、核反応でヘリウムとトリチウム(三重水素T)に変わる(核融合用のトリチウム生産に重要な反応)からである。このようにリチウム6は、中性子を吸収損失させるだけでなく、生体に取り込まれやすい放射性トリチウムをも生むので、二重に好ましくない。

リチウム6とリチウム7は重さに一〇パーセント以上の開きがあるので、この分離は充分経済的に実行できる。すでに分離作業は工業化されていて、こうして得られた水酸化リチウムで軽水原発の水質管理も行なわれている。将来的に多量生産されれば、リチウム7は九九・九九パーセントの純度でグラム当り六〇円以下になると見込まれていて、経済性に問題はない。

さて、フッ化ベリリウム(BeF_2)と、リチウム7のみからなるフッ化リチウム(LiF)とを混ぜた二元系溶融塩は、核燃料用溶媒としては、重水と対比できるくらいに、もしくはそれ以上に優れた材料である。オークリッジ研の研究員たちは、三つの元素の頭文字(F、Li、Be)を採って、これにフリーベ(Flibe)という愛称を付けた。以後はこの略称を使用する。

このフリーベ溶媒は、最低の融点が三六四度であり、フッ化リチウムが七〇〜四〇モルパーセント(モルパーセントは分子量比を示す単位)の領域であれば、五〇〇度以上で充分化学的に安

定かつ低粘性の常圧液体として使える。これらは化学的に最も安定な化合物の仲間で、化学反応せず、耐腐食性が充分な容器材料を選定しやすいという特長をもつ。必要な核燃料物質であるウラン・トリウム・プルトニウムのフッ化物の溶解度、さらには、生成する核分裂生成物の溶解度も充分である。

これはまた、核分裂で発生した熱の輸送媒体（冷却材）を兼ねるが、熱輸送に必要な熱容量が最も大きい液体のひとつでもある。理想に近い液体というべきで、炉特性は格段に向上でき、その特徴は多彩である（124頁図5－6参照）。

再び、熔融塩とは？

このようにフッ化物熔融塩は決定的に重要なので、いささか小難しい話になるかもしれないが、もう一歩踏み込んで解説したい。

何度も言うように、塩の中で最も親しまれているのは食塩（塩化ナトリウム）だろうが、最も単純なのはフリーベの主成分のフッ化リチウムである（次頁図5－2と図5－3）。

図5－2に示したように、リチウム陽イオンの電子構造は、ヘリウム（He）原子の電子構造と全く同じであり、電子が最も安定な状態にある。元素の化学的性質はほとんど外殻の電子構造で決められるので、このことから「リチウム陽イオンはヘリウム元素と同様に化学的活性が全くない」と理解してよい。ただし、正の電荷をもった陽イオンであるから、単独で存在しているので

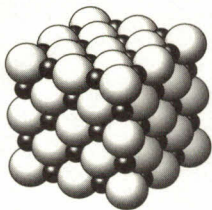



図5-1　食塩の結晶構造
小黒球はナトリウム陽イオン
白球は塩素陰イオン

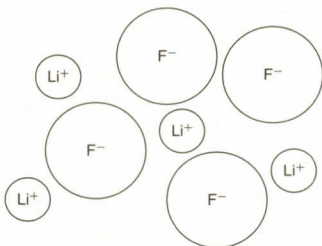



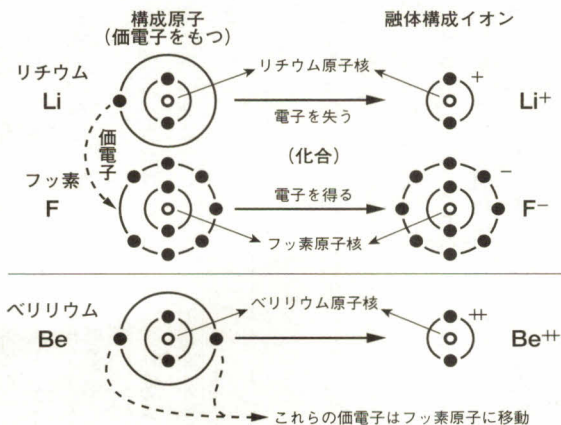
図5-3　二次元的に図解した熔融フッ化リチウム塩の構造
（イオン充塡状態）

Li^+、Be^{++}はヘリウム、F^-はネオンに等しい閉じた電子殻をもち、化学的に不活性（++はプラスの電荷2価を表わす）

図5-2　フッ化リチウムおよびフッ化ベリリウム塩を構成するイオン電子構造

はなく、周りにある負電荷をもったフッ素陰イオンと互いに強く引き寄せ合って、丈夫な固体結晶または安定な高温液体（すなわち熔融塩）を形成しているのである。

また同様に、フッ素も陰イオンになると、ネオン（Ne）と同様な電子構造をもち、化学的に不活性となる（図5-2）。すなわちフッ化リチウムは、ヘリウムやネオンのように化学的反応性がない不活性状態なのである。

ところで、フッ化物熔融塩の話をすると、よく「フッ素のような危険なもので作られているのだから、安定・安全なんて言ってもらっては困る」と大真面目な反論をいただくことがある。たしかにフッ素自体はきわめて活性の高い物質だが、その反論は全くの誤解である。純粋な酸素もまたフッ素ガスと同じくらい危険な物質で、酸素・水素混合ガスは強力な爆薬だが、では酸化物の瀬戸物・セラミックスは危険だろうか？　最も化学的に活性かつ陰性（電子不足：図5-2参照）のフッ素と、最も化学的に活性で陽性（電子過剰）の金属リチウムとが化合すると、電子が移動し中和し合って、物質中で最も安定な化合物になるのである（なお、ベリリウムの場合は、最外殻である二番目の電子殻に電子二個過剰なので、フッ素二個にこの電子二個を一個ずつ与えて二価の陽イオンとなり、フッ素陰イオン二個と組になって安定する）。

このような安定なイオンがざわざわと踊り廻っている比較的低粘性の液体が熔融塩なので、後の図5-6に列挙したような優れた工学的特性が生まれるのである。

地球マグマとの関わり

フリーベ（フッ化リチウムLiFとフッ化ベリリウムBeF_2の二元系熔融塩）は、さらに興味深い特長をもつ。これは、地球のマグマの主成分である酸化マグネシウム（MgO）と酸化シリコン（SiO_2）の二元系のマグネシウム珪酸熔融塩と、きわめて類似の液体なのである。フリーベに対応づけると、フッ素に対応するのが酸素（原子番号八、二番目の電子殻に電子二個不足）、リチウムに対応するのがマグネシウム（同一二、三番目の電子殻に電子二個過剰）、ベリリウムに対応するのがシリコン（同一四、三番目の電子殻に電子四個過剰）である。

このマグネシウム珪酸塩の温度軸を、絶対温度軸（常温に約二七三度を加えたもの）で考えて約三分の一に縮めると、両者の融点・密度・粘性・当量電導度などが数値的に一致する（我々の研究による）。それぞれの熔融塩を構成するそれぞれのイオンの相対寸法比率が、二組でそっくりだからである（つまり、リチウム／ベリリウム／フッ素イオンの半径の相対寸法比率〔〇・五七／〇・二一／一〕が、マグネシウム／シリコン／酸素イオンの半径の相対寸法比率〔〇・五一／〇・一九／一〕とよく一致し、その結果として液体中の立体的なイオン構造配置〔そして諸性質〕が、ほとんどそっくり同じになるのである）。

ただし、各イオンの電荷はマグネシウム珪酸塩がフリーベの二倍（つまり酸素二価に対しフッ素一価、マグネシウム二価に対しリチウム一価、シリコン四価に対しベリリウム二価）で、そのために静電引力が強くマグネシウム珪酸塩のほうが融点が高い。その点を除けば、両者の物理化学的

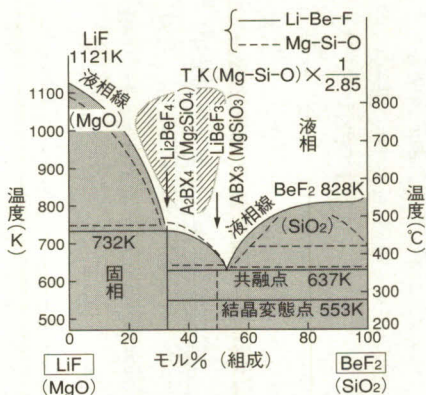



図5-4 フッ化リチウム−フッ化ベリリウム（LiF−BeF_2、フリーべ）系とそれに相似な酸化マグネシウム−酸化シリコン（MgO−SiO_2）系熔融塩状態図の比較（後者の絶対温度Kは1／2.85に縮尺）

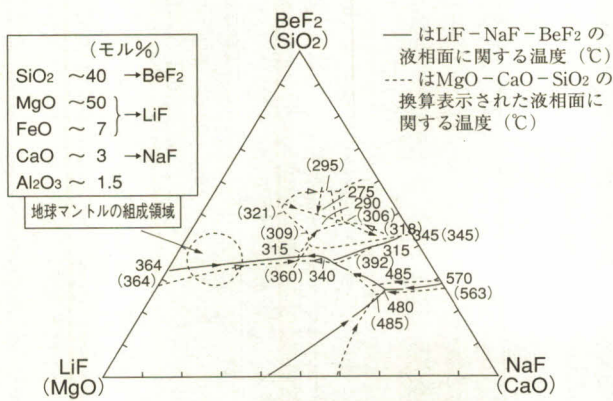



図5-5 LiF−NaF−BeF_2 系とMgO−CaO−SiO_2 系熔融塩状態図の比較（後者は絶対温度軸で1／2.85に縮尺）

性質は同様と考えてよい。熔融塩の物理化学的性質は、イオンの寸法と電荷でほとんど決まってしまうことの良い証明である。両者の状態図を重ねて、図5－4（前頁）に示した（こうした図になじみのない読者は、図の読解をパスしていただいてかまわない）。

実はこれだけでない。リチウムをナトリウムに、マグネシウムをカルシウムに置換えたNaF—BeF_2およびCaO—SiO_2系の熔融塩の間でも、ほぼ同様な関係が成立する。したがって例えば図5－5（前頁）に示したように、三元の熔融塩のLiF—NaF—BeF_2およびMgO—CaO—SiO_2の状態図が、図5－4と同様にほぼ一致するのである。

これはきわめて興味深いことである。なぜなら、地球マグマの母体であるマントルの標準組成は図5－5の左上の枠内に示したような組成が標準である。これはまた、この図中に円形で示した辺りに相当し、マグネシウム珪酸塩（MgO—SiO_2）の組成にかなり近い。従ってフリーベ（LiF—BeF_2）に充分類似しているのである。

ご存知のように、熔融マグマは物質を溶解し包容する力が大きい（その溶解包容の機能を利用して、金属精錬に熔融珪酸塩〔スラグ〕を使うことは前に述べた）。したがってフリーベの利用は、地球の化学的営みを真似ているともいえる。化学的作業媒体として絶好であるゆえんである。

熔融塩技術のまとめ

ここで、熔融塩技術そのものについて少し整理しておきたい。ただし、話題をあまり一般化せ

ず、「フリーベ系熔融塩核燃料」という具体例に即して解説することにする。

ここまでの解説を要約しよう。このフリーベ系熔融塩核燃料は、約五〇〇度の融点以上の温度では透明なひとつの単純な液体相に過ぎないが、これで「核燃料を溶かし込む核反応媒体・反応熱を運び出す熱輸送媒体・反応生成物を処理する化学処理媒体」の三機能すべてを果たすことができる。このような高度の機能すべてを一液体が果たすので、「核化学反応エネルギー利用発電所」という実に複雑多岐な内容をもつ装置が、機構的には最も単純な設計にまとまる見通しが得られたのである。図5-6（次頁）にそのことを整理しておいた。

これまでに説明した性質がひとつ欠けても落第であり、まことに幸運なことである。

図5-6の説明として、いくつか補足しておくと、放射線を浴びてもイオンの熱運動が激しくなるのみで、照射損傷は受けない。イオンの電子殻に電子がしっかり捕まっているので、化学不活性・透明（すなわち光と反応しない）となる。このような単純な物質では、「熱容量は一定体積内にある原子の数に比例する」という物理法則に従うが、リチウム・ベリリウムの陽イオンとフッ素陰イオンの寸法はきわめて小さいから、フリーベが大きな熱容量をもって当然である（したがって、これは実は太陽熱貯蔵用としても有望な媒体である）。

また、安定なイオンは陰陽の区別・電荷の数およびイオンの半径でほぼその性格が決まり、各元素固有の化学的性質が消える。地球マグマとの類似性がそのよい事例である。フリーベは、こうして種々雑多な元素のイオンを選り好みせずよく溶解させるので、このことが化学処理操作に

——(溶媒)——　——(主要な溶質)——

燃料塩組成例：　$LiF - BeF_2 - ThF_4 - {}^{233}UF_4 - {}^{239}PuF_3$

［モル%］:［72～74］［15～18］［13～9］　［0.2～0.8］

★溶媒の核化学反応（中性子吸収）は極めて弱い

★安定したイオン集団からなる液体

（特別に理想的なイオン性液体）

◆放射線による照射損傷なし

◆熱容量・流動性が高い

◆融点が低い（480～530℃）

◆透明・常圧

◆化学的に不活性、水に溶けにくい

◆構造材料と良い共存性（～800℃）

ニッケルーモリブデンークローム合金・黒鉛

◆多くの種類のイオンをよく溶かす

核物質（Th・U・Pu）・核反応生成物

◆その挙動が物理化学的によく予測可能

◆キセノン・クリプトンは不溶で分離が容易

炉の再起動容易、放射能災害防止に有利

★ガラス状に固化、放射性物質飛散せず

◆保守修理・解体作業が安全容易

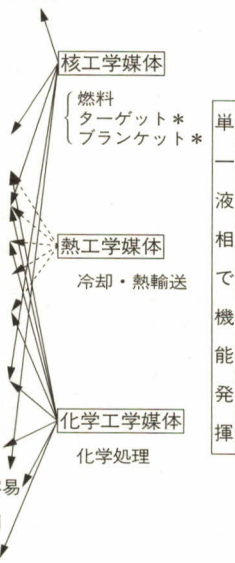



図5-6　フリーベ（$LiF-BeF_2$）系熔融塩核燃料の特色

＊第8章参照

威力を発揮する。

熔融塩による腐食問題は、特に重要なので後にもっと詳しく解説するが、接触する容器材料金属が作るフッ化物が、熔融塩を構成するフッ化物よりも充分に不安定なら、その金属成分がフッ化物として溶け出すのは困難だから、容器は腐食されない。ただし、熔融塩が水分などを吸収して「汚れている」と、それで酸化が助長されて腐食が進む。前もって充分に脱水処理するのが大切である。

少し難しかったかもしれないが、熔融塩技術一般の特長は、以上の解説でだいたいおわかりいただけたのではないかと思う。ただ、もう二点補足しておきたい。ひとつは、熔融塩は蒸気圧が低い上に、他の液体に比べて使用温度範囲が広く、高温まで常圧であるという点である。このために炉を、安全で取り扱いやすい常圧装置として組み立てることができる。これは前述したように種々の元素が互いによく溶解し合い、より低融点の熔融塩になるからである（学問的にはこれを混合のエントロピー効果という）。

今ひとつは、熔融塩は最も典型的な「古典論的（すなわち非量子論的）物理化学体系」だということである。難しいことを言い出したとお思いかもしれないが、内容は単純である。元の熔融塩の物理化学的性質を実験的・理論的に確かめておきさえすれば、それらを混ぜ合わせて作った実用の多元系熔融塩の物性は、ほぼ予測できるということである。

これほどみごとに物理化学的特性が予測できる物質系は他にない、といってよい。それは構成

しているイオン間の相互作用の主体が、古典電磁気学的な静電気の引力・斥力そのものだからである。言い換えれば、安定な電子殻が構成されていて電子に自由がなく、電子が反応に直接関与してくることがないので、物質の振る舞いが簡単に予測できるのである（これが量子化学的反応だと、たとえば水素原子二個を結合させて水素分子一個〔H_2〕を作るような単純な反応でも、電子が直接関与してくるので経過は複雑で、正確な挙動予測は実はきわめて難しい）。

したがって、何か厄介な現象が発見され、改善を要するときでも、ただちに理論的な対策が見つかる。行き当たりばったりの試行錯誤的手法による必要はない。現にそのおかげで、熔融塩炉の研究費・研究人員数は信じられないほどわずかだったのに、短時日にオークリッジ国立研究所のみの努力で高度の進歩発展を遂げ、日本を含む列強諸国がその数百倍の予算・人員を投入して取り組んでいた高速増殖炉の対抗馬に一九七〇年、突如躍り出たのである。私は一九五九年にこの成功を信じ、この炉をライフワークに選んだが、それは右に述べた理由による。

このような熔融塩炉技術の本質は、今後研究開発を推進する際にも、決定的な優位性を発揮するだろう。

オークリッジ研での成功

話をオークリッジ国立研究所での熔融塩の研究開発に戻そう。

オークリッジ研は、ARE（航空機実験炉）の運転に成功した後、ジェットエンジン用として

表5-1 熔融塩実験炉MSREの概略仕様と運転実績（ORNL）

炉型：黒鉛減速・熔融塩燃料冷却・熱中性子炉

燃料塩：$^{7}LiF-BeF_2-ZrF_4-UF_4$（65-29.1-5-0.9モル%）

ウラン235炉心（33%濃縮） リチウム7（99.992%濃縮）

ウラン233炉心（83%濃縮） プルトニウム239 540g

融点：434℃ **体積**：2120リットル（4800kg）

塩出入り口温度：632℃→654℃ **熱出力**：7300kW

炉心：140cm直径×160cm高

黒鉛（密度 1.88g／cm³）：1980リットル

構造材料：ハステロイ-N **冷却材塩**：Li_2BeF_4

運転時間：26076時間 **炉熱出力総計**：13172全出力時間

は温度不足で断念すべきだが、この成果は民間用「増殖発電炉」開発にこそ最適であるという結論を下した。ただちに優れた熔融塩炉研究開発集団が編成され、柔軟かつ体系的な炉設計研究および部分技術開発試験が進められた。

一九六〇年にはその構想が国家的に認められ、本格的な実験炉建設が始まった。こうしてできた「熔融塩実験炉MSRE（Molten-Salt Reactor Experiment）」は一九六五年六月に臨界に達し、一九六九年一二月まで事故皆無といってよい中で二万六〇〇〇時間の運転実績を収め、多彩な全試験計画を完了した。

私は機会を得て一九六八年末にMSREを見学した。他のすべての実験炉が、常に故障・事故を続発させている（それも価値ある成果ではあるのだが）のをよく知っていたので、さぞかし苦労談を聞かせてもらえるだろうと張り切って訪ねたのだが、拍子抜けするほど静かに運転されているのに驚嘆した。

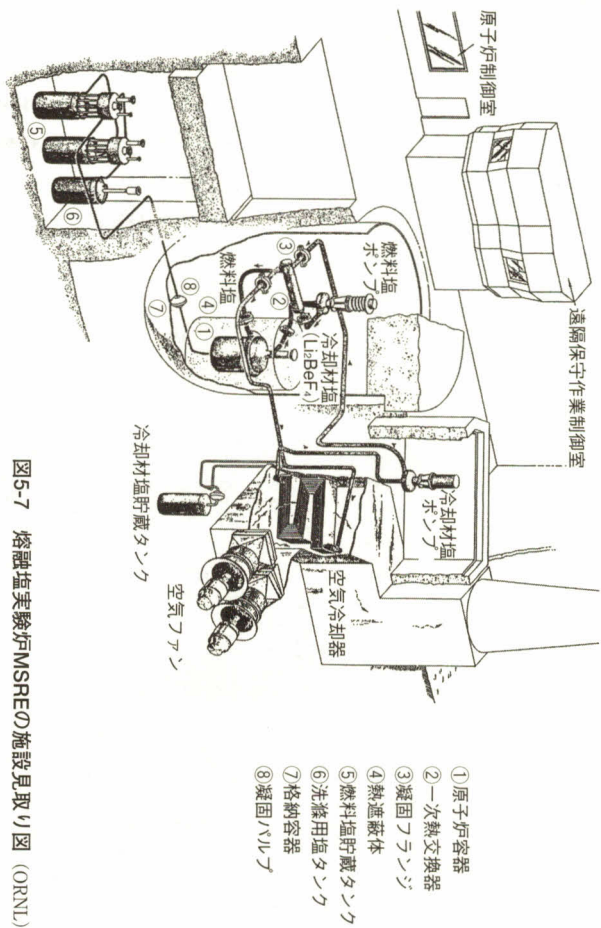



図5-7　熔融塩実験炉MSREの施設見取り図（ORNL）

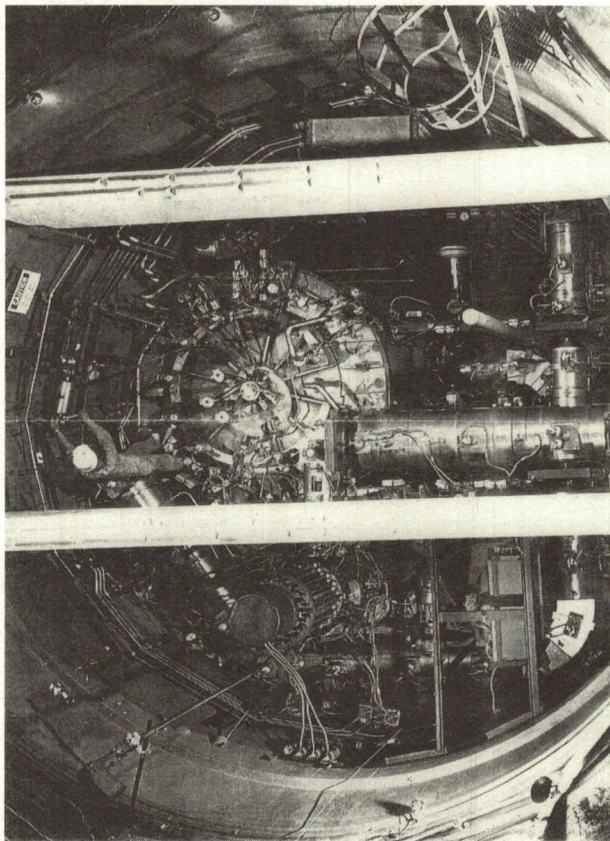
図5-8　運転直前の熔融塩実験炉MSRE炉格納室内部の写真
（ORNL）

いうまでもなく、研究開発チームの優秀性・誠意・熱意・努力の賜物だが、決してそれのみで得られるものではない。この炉の基本設計思想が本質的にいかに優れているかを証明するものであったと思う。

表5-1（127頁）にMSREの概略仕様と運転実績、図5-7（128頁）に施設見取り図、図5-8（前頁）に運転直前の炉格納室内部の写真を示しておいた。

以上から、この熔融塩核燃料が「良い原発」を造るのに大いに役立つことを理解していただけよう。炉の具体的な話は、第七章で詳しく取り上げる。

第六章　「原発」革命　その二——ウランからトリウムへ

資源豊富なトリウム核燃料を採用すれば、
安全性や核拡散に関して問題の多いプルトニウムを排除でき、
より合理的な核燃料サイクルをまとめることができる。

「トリウム」の利用

「トリウム」というのは、一般にはあまりなじみのない元素かもしれない。ウランの原子番号が九二であるのに対し、トリウム（Th）はそれより二つ小さい九〇である。九一のプロトアクチニウム（Pa）は不安定な放射性元素で、すでに崩壊してしまい、現在の地球には存在しない。したがって、トリウムはウランに次いで重い天然元素ということになる。また、ウランよりはるかに入手が容易で、中性子を一個吸収して核分裂性のウラン233になる。これより軽い元素には核分裂エネルギー利用の可能性はないので、トリウム資源は人類にとって重要なものである。

こうした事実は、三〇年以上前であれば、実は世界の核関係者で知らぬものはなかった。事実、日本の政界でさえ、我々がトリウム利用の新計画を発表すると、自民党が派閥を超えた一〇八人でトリウム利用推進議員懇話会を結成（一九八一年）したくらいである。しかしその後、急速に核冷戦気運が高揚し、また原発反対運動も盛り上がって、世界中から忘れ去られ、今は核エネルギー関係の教科書にさえ一言の記載もない。世界の学問退廃の一証拠かもしれない。

さて、前章のフリーベを核燃料に利用する場合、炉は熱中性子炉として設計するのが望ましい。なぜなら、フリーベは軽い元素で構成されていて、それらが中性子減速の手助けをするからである。そしてトリウムは、そのフリーベ利用の熱中性子炉でこそ核燃料としての性能がより良く生かされる。本章ではこの面から、新しいタイプの原発開発の道を探ってゆきたい。

表6-1 世界のトリウム資源（万トン）

国名	確認資源量	推定追加資源量	合計
トルコ	38	50	88
インド	36		36
中国	38.8		38.8
イラン		3	3
米国	13.7	29.5	43.2
カナダ	4.5	12.8	17.3
ブラジル	60.6	70	130.6
ベネズエラ	32.4		32.4
オーストラリア	30	34	64
エジプト	1.5	28	29.5
南アフリカ	3.5	3.9	7.4
デンマーク	5.4	3.2	8.6
ノルウェー	13.2	13.2	26.4
フィンランド		6	6
グリーンランド	5.4	3.2	8.6
その他	12		12
全世界合計	295.0	256.8	551.8

トリウム資源

トリウムには多くの長所があるが、まず資源が豊かで、しかも偏在していないから「独占」などの事態は起きないことを指摘しておきたい。

ウラン資源は非常に偏って存在している。一番広大なアジア大陸（シベリアは不明）では、世界の約一割の資源が確認されているに過ぎない。水に良く溶けるので、海水中に溶け出したのだろう。

一方トリウム資源は、地球化学的にはウランよりも三〜四倍多く存在する。探査の努力はウランに大きく劣るが、それでも確認埋蔵量は、表6-1（上）に示したように、すでにウランを超す約三〇〇万トンである。世界に広く分布し、も

たない国を探すのが困難なくらいだが、残念ながら日本には全くない。しかし、今後一〇〇年間にわたり全世界で使われても、我々の増殖サイクルで必要とされるトリウムの総量は、せいぜい二〇〇万トンほどである。安価でもあるので、どこかの国が必ず売ってくれるだろう。この点、独占状態のウランとは全く異なる。なおウランは、すでに一五〇万トン以上が掘り出されている。

また、一立方メートルの海水中に、ウランが三・五ミリグラム溶けているのに対し、トリウムはそのわずか七分の一の〇・五ミリグラムしか溶けていない。海水に溶けず、海岸の砂の形で、多量にトリウムが存在しているのである。

最も重要なトリウム含有鉱物はモナザイト（モナズ石）である。これは基本的には希土類金属元素（58頁図2-2参照）の燐酸塩で、酸化トリウムを一パーセントから最高一八パーセントまで、酸化ウランを一パーセントまで含む複雑な鉱物である。最近のハイテク電子産業では希土類金属元素が必須だが、モナザイトからそうした希土類を分離した後の、多量のトリウムを含む残渣が、すでに保存されている。

このモナザイトは比重が約五と重く、永年の風化で河床や海岸に黒い重砂（黒砂ともいう）として集積している。インド、ブラジル、オーストラリア、スリランカ、インドネシア、マダガスカル、マレーシア、南アフリカ、カナダ、米国、韓国、エジプトなどに、古くから知られる堆積地帯があり、三〇年前には、トルコ西部の内陸で世界最大級の堆積層が発見された。ウランと異なり、トリウムはアジアにも充分存在する。

たとえば、インドの約半分の海岸では、三〇万トン以上のトリウムが確認されている。最も有名なのは南西のトラバンコール海岸で、ここでは重砂が三〇センチないし一メートルの層をなす。天然放射線量が通常より数百倍強い地帯もあるが、健康異常・寿命低下は認められておらず、チタンや砂鉄の採取などで人々の生活は豊かである。砂鉄・重砂の採取は直(じか)掘りなので、全く地球環境を乱すことがない。坑道を掘削して閉じ込められていた放射性ガスを放散させるウラン鉱山とは対照的である。また、たとえ採り尽したとしても、一夜モンスーンが吹き荒れると、重砂は復活するという。インドの海岸からだけでも、二〇〇〇万トンのトリウムが調達できるかもしれない。

実は近年、トリウムへの関心が高まるにつれ、大きな新鉱山発見のニュースが続出している。たとえば、石油国ベネズエラのアマゾン近くの密林中に、世界最大級の鉱脈が見つかった。今年(二〇一一年)は米国のアイダホ・モンタナ両州で高品位かつ多量のトリウムが見つかり、米国は世界第一位の鉱脈と宣伝している(最近、オーストラリアが一位と言い始めていたところであった)。さらにトルコのアンカラから遠くない地帯で、トーライト系(純度七〇パーセント)の優れた鉱脈が見つかった。これらは皆貴重な希土類資源を伴なっており、その有効開発のためにもトリウムの活用が必須になってきている。

このように、明らかにトリウムは充分に豊富な資源で、すでに数百万トンの確保は全く問題ない。ただし、そもそも公表資源量などは政治的なものと考えるべきである。したがって、目安と

して表6－1を掲げはしたが、現在は信頼のおける一覧表は作れない。

トリウムと人工ウラン元素

天然のトリウムは、質量数が二三二のもの（トリウム232）のみからなる。わずかに伴なうトリウム230は通常一〇万分の一程度に過ぎない。

この天然のトリウム232には核分裂性がないので、そのままでは燃料として使えないが、何度も述べたように、中性子を一個吸収すると核分裂性のウラン233に変換する。これは天然ウランの大部分を占めるウラン238が中性子吸収で核分裂性の人工元素プルトニウム239に変換するのと相似である。前にも述べたが、元のトリウム232・ウラン238などを親物質と呼ぶ（左頁図6－1参照）。

親物質のトリウム232が、もうひとつの親物質ウラン238よりも六だけ軽いことは、重要な意味をもつ。トリウム232が七個も中性子を吸収してプルトニウム239に変わったり、さらに重くなって超ウラン元素のアメリシウム（Am）やキュリウム（Cm）などに変わる可能性は、無視できるからである。

原爆材料に最適で長寿命かつ放射能の強いこれらの元素類と縁が切れるのは、大変な利点である。しかも、この現象を裏返して利用できる。すなわちトリウム核反応炉の中に混ぜて燃やせば、それらは次第に消えて再生されることがない。トリウムは「プルトニウムなど超ウラン元素の消滅作業」の引き受け役を果たすのである（詳細は後述）。

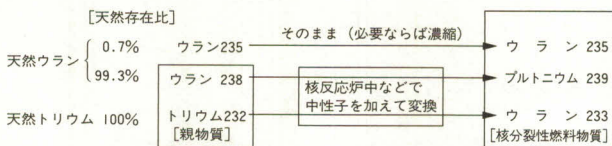



図6-1　天然のウランおよびトリウム資源の核利用

天然トリウムを利用した「トリウム‐ウラン核燃料サイクル」を、天然ウランを基礎とする「ウラン‐プルトニウム核燃料サイクル」と対比させつつ紹介しよう。図6‐2（138、139頁）をご覧いただきたい。

両者は驚くほど類似している。しかしよく見ると、熱中性子に対する振る舞いは少しずつ異なる。トリウム232は、ウラン238より二倍以上もよく熱中性子を吸収して核変換を起こす。その結果できるウラン233は、中性子吸収後に約九割が核分裂を起こす。一方、ウラン238から生ずるプルトニウム239は、約六割しか核分裂を起こさない。後者はその代わり、さらにもう二個中性子を吸収して核分裂性のプルトニウム241となり、両者あわせてプルトニウム燃料の主体となる。ウラン233からも同様にウラン235が生じるが、こちらはそれほど重要ではない。

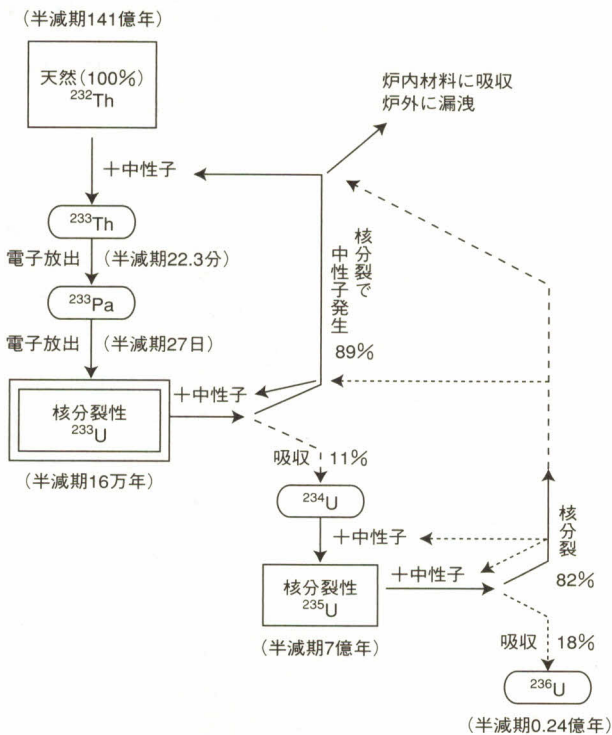
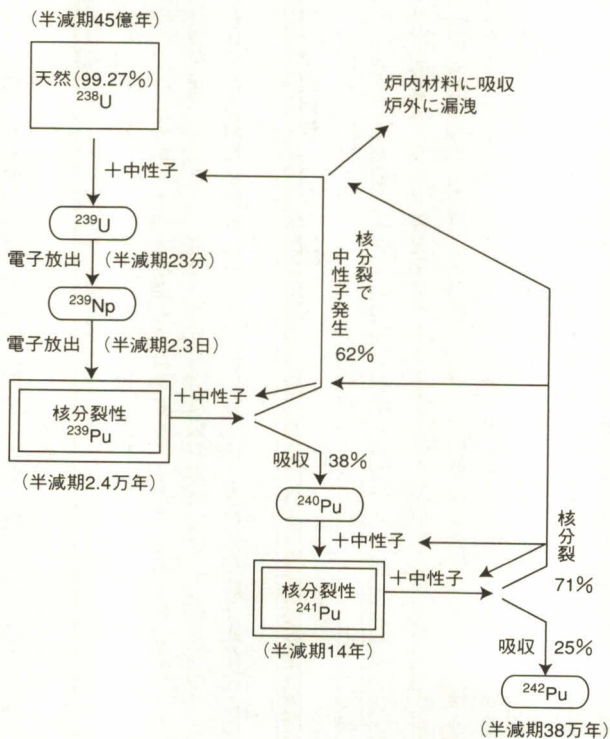
もうひとつの大きな差異は、中間生成物のプロトアクチニウム（Pa）233のベータ崩壊（電子放出）の半減期が、同じ位置を占めるネプツニウム（Np）239よりも一二倍も長い（二七日）という点である。プロトアクチニウム233は炉内に留まっていると中性子を吸収してプロトアクチニウム234となるから、ウラン233への変換量が減って損である。そのため実際の炉では、プロトアクチニウム233を化学分離して炉外に数十日保管し、ベータ崩壊に

A. トリウム-ウラン核燃料サイクル

図6-2　二種の核燃料サイクルの概要図

B. ウラン-プルトニウム核燃料サイクル

Th：トリウム、U：ウラン、Pu：プルトニウム
Pa：プロトアクチニウム、Np：ネプツニウム

よるウラン233への変換を終えてから炉に戻すことが、反応効率を落とさないためにも必要だとも考えられた。しかし、中性子密度を下げた本書の炉構想（第七章で紹介する）では、このことはほとんど問題にしなくてよい。

ここで図6－3（左頁）のトリウムの反応過程の整理をしておくと、ウラン233の核分裂で生まれた中性子は、黒鉛原子核と衝突して減速され、少なくとも一個は別のウラン233に吸収されて次の核分裂を起こし、また一部はトリウム232に吸収されてウラン233を再生する。次章で提案するトリウム利用の黒鉛減速熔融塩炉では、炉心でこのような連鎖核反応が起こっているのである。

高ガンマ放射性「ウラン232」

炉の設計には関係しないが、トリウム核燃料を取り扱う上できわめて重要な現象がある。ウラン233には必ずごく少量の「ウラン232」が副産・随伴するのだが、このウラン232は半減期七二年でアルファ崩壊（アルファ線発生＝ヘリウム原子核の放出）を次々に続け、終わり近くにタリウム（Tl）208を生み出す。実は、これがもつガンマ線強度が異例に高く、エネルギーが二・六ＭｅＶと通常のガンマ線の一〇～二〇倍で、遮蔽が容易でないのである。その強度はウラン232生成一年後には充分高い値となり、一〇年後に最大になる。そして一〇〇年後にやっと減ってくる。

このことは、トリウムを「固体核燃料」として利用するときに、大きな困難として立ちふさがる。なぜなら、ウラン235を使う場合に比べ、燃料製造時のこのガンマ線の遮蔽が大変で、化学処

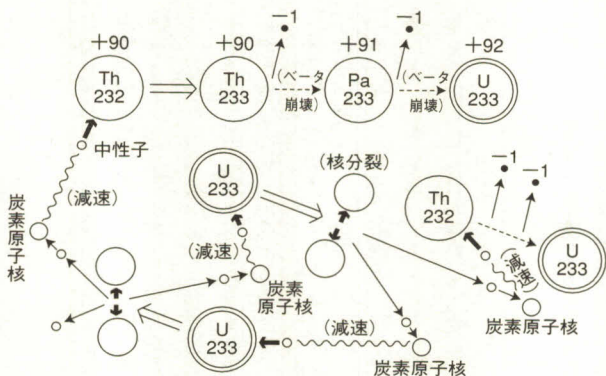



図6-3　熔融塩炉心内のトリウム(Th)–ウラン(U)連鎖核反応の一部の図解

○は中性子、●は電子、○➡は中性子吸収、----はベータ崩壊
プラス・マイナスのついた数字は電荷数、Paはプロトアクチニウム

理費や再加工費や輸送費が、たいそう高価なものとなるからである。このことが主なネックとなって、トリウム利用は広まらなかったのである。

しかし、「液体」であれば話は別である。液体の熔融塩核燃料は遠隔操作で濃度調整・輸送などが行なえるので、遮蔽に全く困難がない。また、逆にこの強いガンマ線を利用して、核物質の盗難監視や検出・検知が容易となる。テロ対策には最適だが、第一〇章で触れるように軍事利用には最悪となり、我々にはまことに好都合である。

一九六八年末に私が米国オークリッジ国立研究所の熔融塩実験炉MSREを見学した話は前に述べたが、その際、炉制御室の外の廊下を歩いていると、その壁

に小さな写真が掲げてある。見ると、ワインバーグ所長、ローゼンタール熔融塩炉計画リーダーらがシーボルグ米国原子力委員長と乾杯している。「なぜ乾杯を?」と聞くと「一週間前に世界で初めてウラン233を燃料に運転開始したのを祝ったのだ」とこともなげに言う(MSRE初期の装荷燃料はウラン235だった)。シーボルグ博士は、世界最高の核化学者のひとりであり、核分裂性物質ウラン233の発見者(一九四三年)だから、さぞかし満足だったろうが、それはともかくとして、そのウラン233により世界で初めて運転されたMSREの核燃料塩が三〇年間保存されていて、そのウラン中に残っているウラン232は約〇・〇二パーセント(二二〇ppm)である。次章で提案する小型熔融塩発電炉の場合は、二・五倍の五五〇ppmくらいになる。

これらの核燃料中のウラン成分は他のウラン同位体もかなり含むので、これで原爆を作ろうとすれば、控えめでも総量一〇キログラムのウランを取り出す必要があるが、その取り出したウランから五〇センチの距離にいれば、数時間で致死量の放射線を浴びてしまう。だからといって遮蔽しようとすると、コンクリートで一メートル、鉛で二五センチの厚さが必要である。このようなものは処理も持ち運びもできないし、テロリストらが秘密に仕掛けてもすぐに検知できるのである。

プルトニウムの有効利用と消滅

一方、ウラン238から作られるプルトニウム核燃料の場合は、すべてが逆である。まず、プルト

ニウム239のガンマ線強度は全く問題にならないくらい弱い。アルファ線は多量に出るが、その実体は大きなヘリウム原子核だから、ガンマ線（電磁波）やベータ線（電子線）とは異なり、紙ででも遮蔽できる。何かでパックすればポケットに入れて持ち出せ、検知は困難で、テロリストには絶好の獲物、社会的には大変な厄介ものである。

それで米国では、法律によって使用済み核燃料から化学再処理でプルトニウムを抽出することを禁じ、地下岩塩層内にそのまま保管する計画を進めていたが、これにも問題がある。米国原子力委員長であった故シーボルグ博士は、「そうして保管を進めれば、そこは五〇〇年後には『プルトニウム鉱山』になってしまう。放射能レベルが五桁下がり、容易にプルトニウムのみを取り出せるようになるからだ」と警告した。そして地域の反対で廃止を決めた。

そもそもプルトニウム239（そして241も）は、核分裂を容易に起こす貴重なエネルギー源（また中性子源）である。それをただ貯蔵放置したり無駄にしたりするのは、無能の極みといわねばなるまい。

日本政府もプルトニウムの処置に困り、通常のウラン燃料と混ぜてウラン・プルトニウム混合固体酸化物（ＭＯＸ（モックス））核燃料に加工し（まだ日本に製造工場はない）、軽水原発で燃やしているが、手持ちの貴重な核分裂性物質を営々と減らすだけである。しかも、軽水原発では一回の燃焼でせいぜい半分しか燃やせないので、解体・再処理・再加工・燃焼を繰り返さなければならず、不経済である。世界各国が、日本はプルトニウムで原爆を作ろうとしているのではないか、と疑って

いるから、MOXは非核武装の政治的ジェスチュアとして必要なのかもしれない。しかし、MOXの推進は日本各地の原発にプルトニウムを分散させ、明らかに発電コストを高め、無駄な経費を増大させる。もっと有効に利用しつつ消滅させるべきである。

プルトニウムを消滅させるにはトリウム系核燃料炉、それも熔融塩炉に入れるのがよい。入れる他はないだろう。既存のウラン利用炉で燃やしたのでは、炉内でウラン238から再び燃やした半分のプルトニウムが作られる。ただし、トリウム炉でも固体核燃料炉であれば、一回の燃焼で入れたプルトニウムの半分くらいしか燃やせない上に、前記ウラン232の高放射能のために、ほとんど後の化学処理・燃料体加工ができない。その点、トリウム熔融塩炉であれば、溶かし込まれたプルトニウムは着実に燃焼消滅できる（第一〇章で詳しく述べる）。

これは、日本の国是である核兵器全面廃絶にも、最も有効な具体策となろう。核兵器の廃絶があって初めて、真の核エネルギー平和利用が世界に展開できるのである。

使用済み核燃料の化学処理

使用済み核燃料は現在世界中に貯まってきていて、みんなが処理に困っているから、まずその化学処理を解決すべきだが、既存の化学処理法（有機溶媒抽出のピュレックス法）はきわめて高価で問題が多い。そもそもこのピュレックス法は、純粋なプルトニウムを得るための軍用技術で、経済性は二の次だったから、処理工場では、水素を多量に含み減速材そのものである水・有機溶

媒が、ふんだんに使われる。それで工場では、重大な臨界事故を起こさないよう装置が徹底的に細分化されていて、仕組みが驚くほど複雑である。

軍用に依存して整備されたこの種の工場が、イギリス・フランス・ロシアでのみ稼働している。日本も委託処理をしており、また、技術導入で青森県六ヶ所村に同種の工場を造るべく、二兆二〇〇〇億円という巨大な投資を続けているが、これは一〇〇万キロワット原発三〇基分をまかなうに過ぎないので、すぐにまた第二工場が必要となる（日本には二〇一一年四月現在、五四基の原発がある）。米国・ドイツは再処理そのものを放棄してしまい、前記三カ国の工場では、世界中で貯まってくる使用済み核燃料の数分の一しか処理できない。

では、どう処理を進めたらいいのか？　私は世界の仲間とともに、早くから「フッ素化熔融塩化学処理法」を提案している。この技術は、フランスがまず基礎を作り、次に旧ソ連が中心になり、フランス・チェコの協力を得て、一九八八年頃までにほぼ完成した。元来の目的は、高速増殖炉の使用済み酸化物核燃料を、粉体にして一気にフッ素ガス中で反応（高温燃焼するのでフレーム反応といわれる）させ、生成した気体状のフッ化ウランやフッ化プルトニウムを分離しつつ、熔融塩中に溶かされた核分裂生成物を処理し、再び高速炉用の酸化物核燃料を作る、というものである。

この技術の根幹となるフッ素化フレーム反応塔技術は、ウラン酸化物からウラン濃縮用の六フッ化ウランガスを作る技術として、南仏のピエルラットで大規模に実用化されている。旧ソ連は

この技術開発を「FREGATE（フリゲート）計画」と名づけ、総合プラントをほぼ七〇パーセント完成させたところで中止した。資金が続かなくなったのである。

この計画をこのまま踏襲する必要はない。化学的に邪魔でない核分裂生成物は熔融塩中に残したままでよい上に、改めて固体酸化物燃料に戻すための製造・再加工（厳重に純度管理しないと良いペレットは作れない）などは、一切行なわないでよいからである。かなり汚れた（つまり、さまざまな核分裂生成物が溶けた）フッ化物熔融塩のままで、適当にフリーベ（フッ化リチウムとフッ化ベリリウム）やフッ化トリウムなどを添加すれば、簡単にプルトニウム含有の熔融塩核燃料を整えることができる。塩中に留められたプルトニウムその他の核廃棄物は、熔融塩炉を運転する中で、放射性崩壊や中性子吸収によって核分裂し、次第に消滅するのである。

すなわち、本来のFREGAT処理装置から固体核燃料再生工程を取り除き、熔融塩核燃料の調達のみを目的とするものに変えれば、驚くほど単純化できて、世界中の使用済み固体核燃料が充分経済的に処理できる。世界中でこれを利用してプルトニウム含有熔融塩を準備し、トリウム熔融塩炉で燃やすのが、最良で経済的な解決策である。

この章はトリウム熔融塩核燃料の優位性の説明から入ったので、使用済み核燃料の処理についても言及したが、これからは炉システム本体の話に移ろう。

第七章　「原発」革命　その三――大型から小型へ

小型熔融塩発電炉FUJI（不二）

世界中で使われるためには、原発は「小型」でなければならない。
この小型化を果たした新構想「小型熔融塩発電炉」により、
炉寿命を終えるまで核燃料の取り替えが不要、
しかも使用した核燃料を炉内で自給自足するという、
理想的な原発が実現できる。

世界に「小型安全炉」を

今まで原発を利用してきたのは、主として先進国だった。そうした国々では送電施設がよく整備されているので、原発は大規模でよかった。これまでは技術が未熟であり、また、核物質管理には特別の政治的配慮が必要で、分散させたくなかったからである。

しかし、今後の地球規模のエネルギー問題の解決のためには、世界で広く多量に、かつ経済的に利用してもらわなければ価値はない（中途半端に少規模な利用をするくらいなら止めたほうがよい）。核エネルギー技術の社会的使命はますます大きくなっている。当然、原発の量・質における革命が必要である。

その目的のために、前章までに「液体核燃料」および「トリウム」の利用を奨めてきたが、さらに第三番目として「小型化」を提案したい。原発を成熟した公共施設として需要地の近くに建設することで、投下資本の節約と電力コストの低減化を計る必要があるからである。現在の日本のように数百キロもの送電をして、電力コストが二〜三倍になるのは論外である。

その目的達成のためには、第五・六章で述べた技術思想、すなわち、液体の一種の熔融塩「フリーベ系熔融塩核燃料」を利用して、まず「小型熔融塩発電炉の実用化計画」を完成することである。それを本章で考えてみる。

炉の設計は無数に構想できるが、開発初期には単純堅実な道を選ぶのが最も大切である。特に、この炉は既存の原発の炉と本質的に異なる上に、より経済的優位性が期待できるので、無理のな

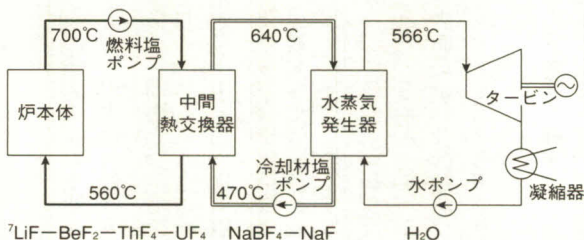



図7-1　熔融塩発電炉FUJIの基本構成

い標準的設計思想の確立・現実化こそ第一歩、と考える。

そのような視点に立って、私は「ＦＵＪＩ（不二）系列」と称する設計思想で計画を推進している。その中心は一〇万～三〇万キロワット発電規模の小型発電炉で（既存の軽水炉の発電規模は小さなものでもほぼ六〇万キロワット程度はある）、代表はＦＵＪＩ－Ⅱと呼んでいる炉（一六万キロワット）である。本章ではもっぱらこの炉の具体的解説を行なおう。

ＦＵＪＩ－Ⅱの構成

ＦＵＪＩ－Ⅱの全体構成を図７－１（上）に示した。炉本体容器を下から上に核燃料熔融塩が貫流している。炉容器と中間熱交換器を結ぶ管（一次系主配管）が二本あり、燃料はその管を通って、燃料塩ポンプにより炉容器から中間熱交換器に送り込まれる。中間熱交換器で二次系冷却材塩に熱が渡されるが、その冷却材塩は二次系ポンプで水蒸気発生器に送られる。その冷却材塩が運んだ熱で水蒸気が作られ、それで水蒸気タービン発電が行なわれるわけである。燃料塩の最高温度は余裕をもっ

て七〇〇度に抑えてあるが、もっと高く設定することはできる（発電以外に熱を工業利用する場合は、もっと高温に設定したほうがよいだろう）。

炉システムの主要な特徴を次に示す。

(一) 炉本体容器は開閉しない単純なタンクで、内部の黒鉛減速材は取り替えない。

(二) 米国オークリッジ国立研究所は「熔融塩増殖炉」というものを提案した。発電しつつ核燃料の増殖も狙うこの炉については、「増殖」問題を解説する第八章で再度触れるが、ここでは、FUJI系列では増殖は必要としないこと、したがって、オークリッジ研の熔融塩増殖炉ではそのための連続化学処理装置を必要としたが、FUJIでは不要となることのみを指摘しておく。連続化学処理装置がないので、炉の付属施設は図5-7（128頁）の熔融塩実験炉MSREに類似した単純なものとなる。核分裂生成物のクリプトン・キセノンガスは九九パーセント除かれる。

(三) 燃料塩が循環する一次系全体は、塩の融点の五〇〇度以上に保たれた高温格納室に収められる。したがって、予熱用のヒータ・保温材・熱電対温度計などは不要である。こうして装置の表面が余分な機器が付属しない「裸」の状態なので、高温・高放射性ではあっても遠隔操作・ロボットによる保守点検や修理に不便がない。図7-4（160頁）も参照願いたい。

炉本体の構成

●燃料塩　フリーベ系熔融塩核燃料を使用する。標準組成としては、フリーベ（フッ化リチウム

〔七二モルパーセント弱〕・フッ化ベリリウム〔一六モルパーセント〕）にフッ化トリウム〔一二モルパーセント〕およびフッ化ウラン233を溶かして使用する。フッ化ウラン233は〇・二〜〇・三モルパーセント〔約一重量パーセント〕という少量であり、その分だけフッ化リチウムのモルパーセントを減らす。

固体核燃料の場合には、少しでも燃料設計の変更を行なうと、使用する前に、あらかじめ照射燃焼試験を行ない、性能を確かめておかなければならない。これには高性能の照射試験炉が必要であり、高放射化された試験体の解体・解析にも莫大な時間と経費を要するが、熔融塩核燃料の場合には、少々設計内容を変更しても、照射燃焼試験などは一切不要である。第五章で述べたように、照射損傷を受けず性能・挙動がよくわかっているからで、これだけでも経済性・安全性の向上への貢献は多大である。

●黒鉛　黒鉛（炭素）は燃料塩に接触しても反応せず腐食もしないので、裸のまま燃料塩中で使用してよい。融点が四〇〇〇度で、かつ高い熱伝導度をもち、中性子照射損傷に耐える良い材質の黒鉛が、米国・フランス・ロシアで開発されている。

●容器材料（ハステロイ-N）　塩を構成するフッ化物よりも不安定なフッ化物しか作らない金属を容器材料に使えば、腐食は起きない。また、容器の外側は外気による酸化腐食にも耐えなければならないが、これにはニッケルが主体でモリブデン・クロームを加えたハステロイ-Nと称するよい耐熱合金が開発され、充分な耐腐食データが得られている。日系二世のイノウエ博士が基

礎を作った。なお、固体核燃料炉で使われる薄い燃料被覆管のような、激しい中性子照射損傷や熱応力（温度変化によるひずみ力）に曝される部品はない。炉心は燃料塩と黒鉛のみで構成され、金属材料は全く存在しない（157頁図7－3）からである。

炉心設計

塩の組成や黒鉛の配置などを考えつつ炉の性能計算を繰り返し、次の条件に最適な炉心のありようを求めた。

（一）黒鉛の照射損傷が許容限界内にあり、炉が寿命を終えるまでは黒鉛を取り替えないこと、
（二）燃料塩の総量をできるだけ少なくすること、
（三）トリウム親物質からのウラン233の再生転換率を大きくすること、
（四）炉の安全な自動制御ができるように、炉反応度の温度係数がマイナスである（昇温が始まると、それを抑える機能が自動的に働く）こと、

などである。

その研究過程で面白いことを発見した。小型炉であるからウラン233への高い転換率は二の次と考えて設計を始めたが、黒鉛を取り替えないという（一）を満足させるには、低出力密度を選ぶこととなる。具体的には平均熱出力を炉心一リットル当たり約一〇キロワットとすれば、炉心の熱設計、すなわち黒鉛の形状、塩の流量流速などの選定が無理なくできる（軽水炉では三〇～六

〇キロワット、高速増殖炉では一〇〇〜一〇〇〇キロワットと高密度である）。こうすると熱除去は楽になり、冷却材を兼ねる燃料塩は量も流量も少なくてよい。

これは、燃料塩の分量に対する減速材黒鉛の分量（黒鉛比）が増えたのと同じで、その結果、黒鉛による中性子減速機能が高められ、ウラン233への燃料転換率が大いに上がり、ほぼ一〇〇パーセント、すなわち燃焼したウラン233を同量再生産するという「核燃料の自給自足」が達成された（軽水原発では五〇〜六〇パーセントである）。

また、電気出力の調整は塩の流量調整によるが、電力需要が増すと自動的に塩流量が増やされて電気出力が高まるという負荷追随性も充分に高い。

これで、核燃料の自給自足が可能な発電炉が小型（低発電量）でも実現できた。これは理想的な核エネルギー発電所を意味する。理由はこうである。

前述したように、軽水原発などの固体燃料炉では、運転を続けると核燃料が消費され不足してくるから、前もって臨界量よりも三〇〜五〇パーセント余分に燃料を装荷しておき、反応が起こり過ぎるのを多数の制御棒で抑えつけている。それで、燃焼が進むとともに制御棒を引き抜かなければならないが、これでは発生した貴重な中性子が無駄に制御棒に食われてしまい、良い炉になるはずがない。

ところが、ＦＵＪＩでは運転を続けても、燃料が自給再生され、炉の核反応力はほとんど変動しないので、臨界条件より余分な核燃料の添加や炉制御操作は最小限でよく、核燃料の追加出し

表7-1　小型熔融塩炉の主要特性値

	不二 FUJI 燃料自給自足 FUEL SELF-SUSTAIN	ミニ不二 miniFUJI 超小型 PILOT-PLANT	Oak Ridge N.L. MSRE 実験炉 （1965〜69運転）
熱容量　（万kW）	35	1.67	0.73
発電容量　（万kW）	16.1	0.7	…
効率　（%）	46	42	…
炉寸法（径×高）　（m）	5.4×4	1.8×2.1	1.45×2.2
高温室（径×高）　（m）	12×8	3.7×2.2	（5.8×7.2）
核燃料転換率　（%）	100.2	58	…
^{233}U保有量　（kg）	370	27	32
^{232}Th保有量　（kg）	20,100	650	…
$^{233}UF_4$濃度　（モル%）	0.22	0.47	0.14
総量　（m^3）	13.7	0.45	2.1
流量　（m^3/分）	33.2	1.59	4.5
温度　（℃）	585〜725	560〜700	632〜654
主配管（径）　（cm）	25	8	15

入れなどの調整操作も最小限ですむ。こうしてこの炉は飛躍的に核反応的・工学的性能が向上し、運転保守性・安全性・燃料経済性が決定的に改善した。

ＦＵＪＩ-Ⅱ炉の主要特性値を表７-１（上）に集めた。炉全体の構成を示す概念図は図７-２（左頁）である。

炉本体の詳細

●炉容器　内径五・四メートルで高さ四メートルの直円筒状の単純なタンクである。材質はすべてニッケル合金のハステロイ-Ｎである。炉を流れる燃料塩は常圧で圧力がかからないから、肉厚は二〜五センチで充分で、内部に黒鉛を装荷した後に熔封される。開閉する大きな蓋などは不要で、それだけ重量が軽くなる。制御棒以外の稼働部はない。主配管

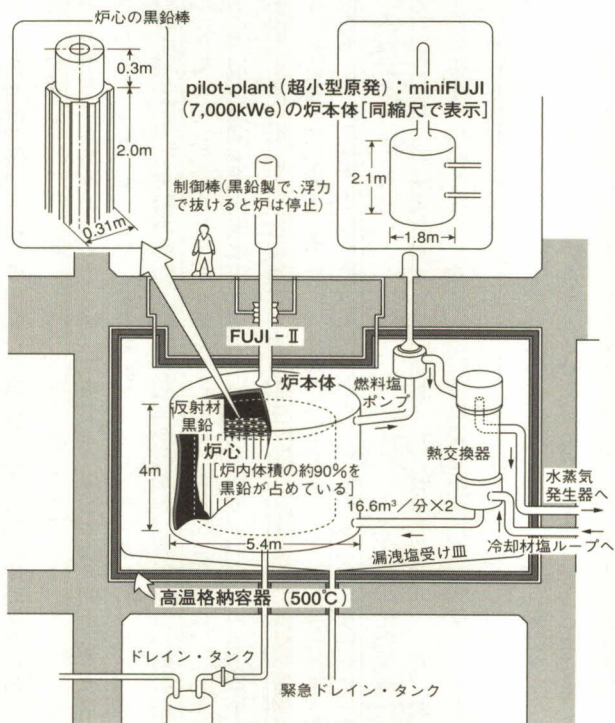



図7-2　燃料自給自足型小型熔融塩発電炉
（FUJI－Ⅱ、16万kWe）の概念図
高温格納容器内に格納、右上にminiFUJI炉本体も図示

はわずか二五センチ径でよい。燃料塩の熱容量が大きく、流量が少ないからである。

●炉の内部構造　炉内には黒鉛のみが裸のまま充塡されている。炉心部は図7-2の上部に示したような六角形の黒鉛棒が占める。棒の中央および周辺に比較的小さな燃料塩の流路が設けてある。棒の上下部は少し細くなり、塩の流量配分を均一にするための溜りが形成されている。炉壁側には数十センチ厚の黒鉛の中性子反射遮蔽体が置かれ、容器壁材の照射損傷を防いでいる。

炉内の体積の約九〇パーセントを黒鉛が占める。燃料塩は下部の二本の主配管から流入し、炉心および周辺の隙間を上向きに流れる。流速は緩やかで、炉心の最高速度でも毎秒一メートル以下である。炉本体断面の立体模型の写真を図7-3（左頁）に示した。模型ではあるが、かなり実物に近いと考えていただきたい。

●制御装置　炉はほぼ核燃料自給自足型であり、炉性能も揺らがないので、制御の専門家も制御棒なしの設計が可能ではないかというが、運転用に一～二本の黒鉛制御棒は必要だろう。黒鉛が引き抜かれると中性子減速が弱まり、炉は停まる。黒鉛の比重は一・八、燃料塩は三・三なので、棒は浮力も助けつつ引き抜かれる。この炉の黒鉛制御棒はまた減速材でもあるから、余分な制御用の中性子吸収物質を持ち込んで中性子を損失させることは一切ない（軽水炉の制御棒が中性子を吸収することでその役目を果たしていることを思い出していただきたい）。

ただし、非常時に挿入して炉を停止させるために、中性子をよく吸収する炉停止棒を一～二本設置することは求められるかもしれない。ただ、この場合でも、停止棒はふだん炉外に置かれる

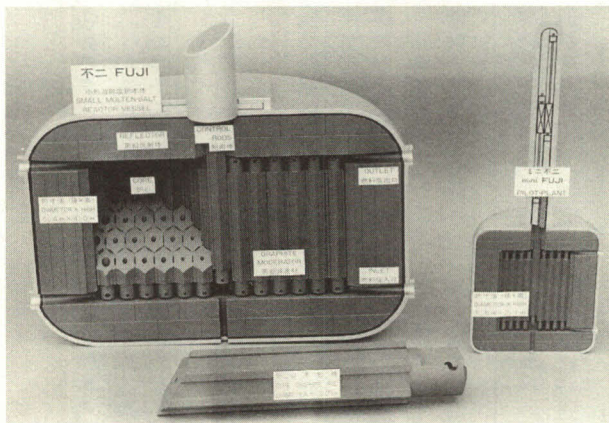



図7-3　標準小型熔融塩発電炉FUJI-Ⅱと実験炉ミニFUJI（右）の炉本体断面の立体模型

ので、中性子損失は起こらない。

その他の一次系機器

●燃料塩ポンプ　燃料塩は常圧高温の液体なので、同じく常圧高温の液体ナトリウムを扱う高速増殖炉用ポンプ技術が流用できる（高速増殖炉では液体ナトリウムを冷却材として循環させる）。液面上部の気相に軸封部分をもつガス軸封遠心ポンプである。ポンプを流れるのは熔融塩なので、高速増殖炉でナトリウム蒸気が気相部に酸化凝着するようなトラブルはない。

液面上部のガス空間は核燃料熔融塩一次系の膨張タンクの役割を果たし、膨張した塩はオーバーフロー配管を通ってドレイン・タンクに落ちる。

●ドレイン・タンク　炉内の核燃料熔融塩は、必要があれば下部のタンクに格納される。この

タンクは塩の組成濃度調節に利用される。タンクの塩は常に少量ずつポンプで燃料塩ポンプ部に押し上げられ、炉容器との間を往復している。

●貯蔵タンク　化学処理工場で作られ運ばれてくる燃料塩は、まず貯蔵タンクに納められ、必要なら塩組成の簡単な化学調整などが行なわれる。

●カバーガス系　膨張タンクでもある燃料塩ポンプの上部には、ヘリウムガスが充填されている。燃料塩の核分裂で生成するクリプトンやキセノンなどのガスは、このヘリウムガス相に移行してくる。これらは一時ドレイン・タンクのガス空間部に送り込み滞留させ、放射性崩壊を進めて安定な物質にする。また、ヘリウムガスを泡状にして燃料塩中に吹き込み、核分裂生成物ガスの積極的な追い出しを行ない、炉内のクリプトンやキセノンによる強い中性子吸収損失を減らして、炉性能の向上に役立てる。

●中間熱交換器　燃料塩で直接に水蒸気発生器を加熱すると破損したときに危険なので、間に冷却材塩循環ループ（二次系）を置き、それによって水蒸気を発生させるが、その二つの塩の中間で熱交換させるのが、この熱交換器である。二つの塩はともに常圧であり、中間熱交換器の設計に特別な困難はない。ただし、比較的低流速であり、乱流となりにくいのに注意しなければならない。乱流でないと、塩中で熱が均一にならず、伝熱効率が落ちてしまうからである。それで、伝熱管外壁に浅い溝を付け、乱流化を強めて伝熱を助けるのもよい。

高温格納室

炉本体を含む核燃料塩が循環している一次系全体は、内部の温度を塩の融点の五〇〇度以上に保ち放射線遮蔽機能をもつ高温格納室に納めることで、安全性を高めている。内部は、酸素濃度を約四パーセントに下げ、少し低圧にした空気で満たされる。下部には、漏れた燃料塩を受けて集める金属皿があり、そこに集められた塩は、貯蔵タンクまたは緊急ドレイン・タンクに自動的に落とされる。

一次系は運転開始後には高放射性となるので、その内部機器の保守修理作業にはすべて遠隔操作のロボット機器を使う。システムは充分に単純であり、機器表面は皆裸なので簡単に近づくことができ、また、保守点検を要する機器は少ない。修理用の空間も充分に確保できる。近年、ロボット技術が急速に向上しているのは好都合である。ただし、唯一の回転機械であるポンプは例外で、ガス軸封より上部の常温空間から保守修理作業を行なう。この内部構造物の健全性は、瞬時撮影の特殊カメラで随時、運転中でも監視確認できるであろう。

この高温格納室の模型写真（次頁図7-4）を示したが、本体がいかに単純な構造であるか明白であろう。

そもそも放射性物質を取り扱うシステムは、すべて遠隔で取り扱うべきものである。これはこの原則を先取りするもので、事実、先取りしやすい単純な設計思想の装置である。常時、遠隔点検監視で、安全性はいっそう高まるだろう。

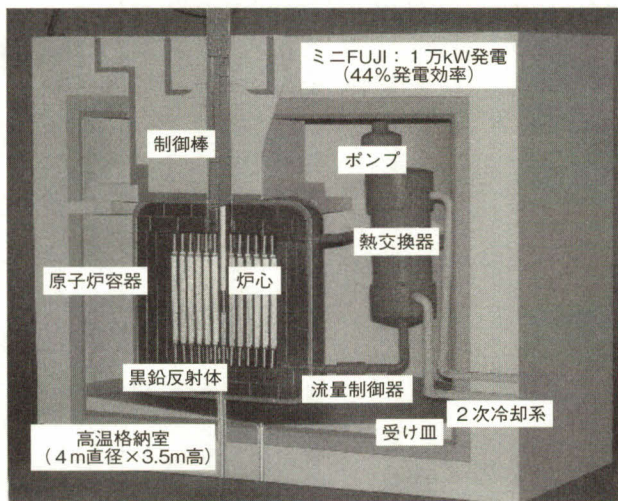



図7-4　ミニFUJIを納めた「高温格納室」の模型

二次系機器・材料

二次冷却材塩の系を廃止したり簡略化したりする設計も考えられるが、保守点検管理が最も確実で安全であることから、FUJIでは二次ループ系を利用する方式を採用した。

●**冷却材塩**　オークリッジ研の熔融塩実験炉MSREでは冷却材塩にも純粋なフリーベを使ったが、これは少し高価なので、FUJIではホウフッ化ナトリウム（$NaBF_4$）に八モルパーセントのフッ化ナトリウム（NaF）を溶かした二元系熔融塩（融点三八四度）を使う。この塩は少しフッ化ホウ素が蒸発しやすいが、密封すれば問題はない。

●**冷却材塩ポンプや貯蔵タンク**　一次系と同様に必要だが、こちらの冷却材塩に

はごく軽微な放射能しかないので、技術はより単純であり、特に解決しなければならない新しい問題はない。

●水蒸気発生器　重要な機器だが、ここでも高速増殖炉用の液体ナトリウム加熱水蒸気発生器への膨大な投資開発成果が活用できる。しかも、ＦＵＪＩで使う右の冷却材塩は、液体ナトリウムのような化学活性および高過ぎる熱伝導による熱衝撃性をもたないので、安全設計ははるかに容易で単純である。構造材料はニッケル合金なので、ステンレス鋼におけるような水による応力腐食などを心配しなくてもよい。

●発電機器　図７‐１（149頁）に示したように、燃料塩の炉の出口温度が高い（七〇〇度）ので、現在のタービン発電技術が要求する最高の水蒸気温度条件が達成でき、なおまだ余力がある。したがって、次第に実用化されてきている最高の超々臨界水蒸気発電技術が適用できるので、近い将来には四十数パーセントという高い「発電効率」が期待できる。発電効率とは発生した熱量の何パーセントを電力に変換できるかを示すものである。軽水原発では一般にこれが三三パーセントに過ぎず、発電に使われた熱の約二倍（＝67/33）の廃熱があるが、四六パーセントの効率なら一・二倍（＝54/46）の廃熱ですむ。もっとも、このＦＵＪＩ‐Ⅱは比較的小型の発電所なので、当面は経済的最適化を考えて、性能を少し控えるかもしれない。

発電所としての全体構成図を図７‐５（163頁）に示した。

燃料塩や構成材料の振る舞い

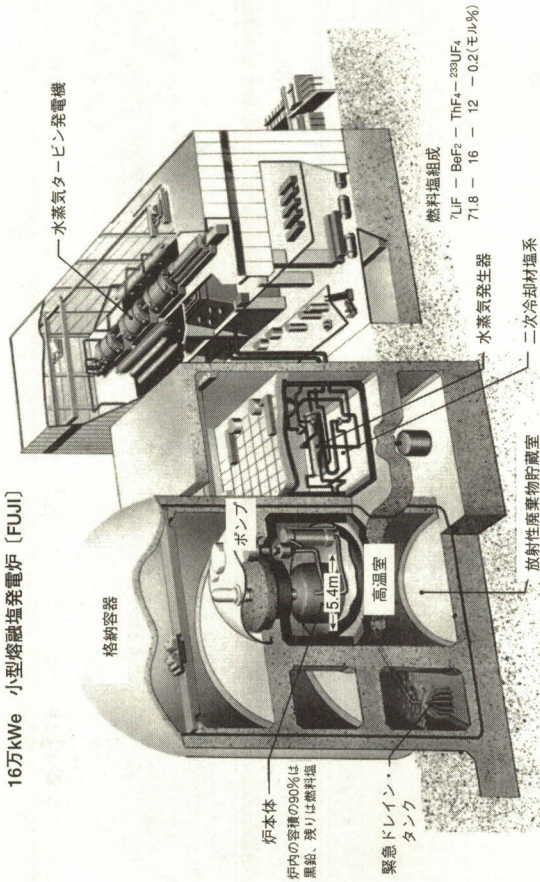
熔融塩炉はここまで述べてきたように、既存の機械的な炉とは性格が全く異なって、化学的性格が強い。そうしたこの炉独特の化学的な振る舞いや運転操作の実態がわかれば、都市の近くに安心して置ける安全な公共施設と認定していただけるだろう。

FUJI-IIは地方都市などに直属した小型発電炉と考えていて、炉の寿命は、初期には保守的に三〇年を想定しているが、全力運転では一五年相当となる。電力需要の変動に応じつつ、平均稼働率は約五〇パーセントとする、ということである。

燃料塩や構成材料が化学的にどう振る舞うか見てみよう。

●黒鉛　黒鉛が燃料塩と反応しないことはすでに述べた。黒鉛材は一般に微細な穴を持っているが、塩が表面張力に抗してそこに浸透しないように、その穴の開口径を一〇〇〇分の一ミリ以下とした良質な黒鉛が開発されている。長尺ものの作製は困難であるが、FUJI-IIでは二メートルあれば充分である。照射にさらに耐えられる良質な黒鉛が開発できれば、炉をより小型にでき、経済性向上に直結する。

●ハステロイ-N　この容器配管材の燃料塩に対する耐腐食性については、詳しい試験がなされている。五六〇度と七〇〇度の温度間で塩を流速毎秒六メートルで循環させた場合でも、せいぜい年〇・〇二八ミリの腐食に過ぎない。中間熱交換器のチューブが最も薄いが、流れる塩は常圧なので全く問題にならない。ただ、実験炉MSREの運転では、核分裂生成物のひとつのテルル

図7-5　小型熔融塩発電所の全体構成図

（元素のひとつ、原子番号五二）が腐食を起こすことが発見された。この問題はハステロイ－Nにニオブ（元素のひとつ、原子番号四一）を一パーセント添加することで解決された。ロシアも類似の材料を提案している。

●燃料塩の振る舞い　ＦＵＪＩ－Ⅱの寿命期間に浴びる全放射線量の五倍を照射しても燃料塩は変わらないことが、試験で実証されている。また、ウラン233が核分裂を起こして消え、代わりに核分裂生成物が生まれるとき、塩の化学状態が中性から少し酸化状態へと変わるはずだが、幸いそれはウランの三、四価イオンの分量比調整によって吸収でき、全く問題とならない。ただ、長期的な運転持続のためには、化学的な手当てが少し必要である。それは少し後の「運転中の操作」の項で説明する。

●核分裂生成物の振る舞い

ＦＵＪＩ－Ⅱでは、毎日三五〇グラムのウラン233が核分裂を起こし、炉の全寿命では合計約一九二〇キログラムが消費される。これから生まれる核分裂生成物を、次の三群に分けて説明しよう。ただし、総合的最終結果は表7－2（左頁）に託し、代表的な元素のみ概説する。なお、これら主要な核分裂生成物元素は図2－2（58頁）の周期律表中にアミをかけて示してある。

第一群――希ガス（クリプトンKr、キセノンXe）とトリチウムT

希ガスは燃料塩にヘリウムガスを吹き込んで、一時間に九九パーセントの割合で炉外に除去す

表7-2 FUJI－IIの寿命終期に蓄積された核分裂生成物の推定総量

	ウラン233からの生成量	燃料塩中の溶存量	気相に分離された量*
〔第一群〕：希ガス（クリプトンKr、キセノンXe）とトリチウムT			
Xe	27.6a/o		312 kg
Kr	6.5a/o		45.9 kg
T			～0.1 kg
〔第二群〕：塩中で可溶安定なフッ化物（周期表でI～IV属の金属）とVIIA属のハロゲン元素			
I	2.6a/o	27.6 kg [0.032m/o]	
Br	0.42a/o	2.8 kg [0.005m/o]	
Te	4.1a/o	43.5 kg [0.05m/o]	
Cs	17.8a/o	56 kg [0.06m/o]	144 kg
Rb	7.2a/o	0.5 kg [0.001m/o]	51 kg
Sr	11.8a/o	28.1 kg [0.047m/o]	60.5 kg
Ba	6.3a/o	0.3 kg [0.005m/o]	72 kg
Ce	14.1a/o	166 kg [0.17m/o]	
Nd	16.4a/o	199 kg [0.2m/o]	
Y	5.9a/o	1.5～7.5 kg [0.003～0.013m/o]	42～37 kg
Zr	30.0a/o	232 kg [0.37m/o]	2～10 kg（？）
〔第三群〕：フッ化物が不安定で金属状（モリブデンMo、セレンSeなどのV、VI属や貴金属）、Cd、Sn、Sb等			
Mo	21.6a/o	[沈澱物175.9 kg]**	2～10 kg（？）
Se	0.9a/o	6.1 kg [0.01m/o]**	
Sn	0.3a/o	3.0 kg [0.004m/o]**	

a/oは原子パーセント、m/oはモルパーセント
*核分裂生成ガスの分離による
**約50%はエーロゾルとして、気相に移行するだろう

る。何度も述べたがこの除去で、それらによる中性子の吸収損失を大きく改善できる。また、ヘリウムガス系内に設置された低温活性炭素吸着ベッドで、それらから生まれる放射性崩壊生成物が分離できる。

トリチウム（三重水素、T）は毎日約三八〇キュリー（キューリーは放射性核種の崩壊数を表す単位）生成する。第二章で述べたように、トリチウムは高温で容易に金属を透過する。それで、この炉でも燃料塩中のトリチウムは、容易に中間

熱交換器の金属壁を透過して、二次系の冷却材塩中の微量水分に移行する（トリチウムは水素の同位体なので、水分子の水素と置き換わる）。この問題はヘリウム気相でトリチウムを含む水分として除湿分離すれば、解決する。実際、オークリッジ研の実験で、一日〇・三キュリー以下の放出に抑えられることが証明されている。軽水原発からは一日約三キュリー放出されている。トリチウムの管理が積極的に行なえるのはこの熔融塩炉型のみで、他の原発は皆自然放出である。

第二群――図２－２の元素周期律表でⅠ～Ⅳ属の金属とⅦＡ属のハロゲン元素

これらは塩中に溶けて安定なフッ化物となる。核分裂生成物の大部分がこの第二群に入る。セシウムCs、ヨウ素Ｉ、希土類金属元素などが安定に保持できるのは好都合かつ安全である。

第三群――モリブデンMo、セレンSeなどのⅤ・Ⅵ属元素やパラジウムPdなどの貴金属

これらはフッ化物が不安定で金属状となる。オークリッジ研の実験炉ＭＳＲＥでは、これらは主として細かい混合粉体となった。ＦＵＪＩ－Ⅱでは、その半量はガス泡の破裂時などに形成される微粉状のエアロゾルとなって気相に移行し分離される。モリブデンの比重は一〇であり、総量約一〇〇キログラムは約三〇リットルの体積になるが、隙間に堆積しかねないような繊細複雑な構造物は炉内にないので、その振る舞いをそれほど心配することはない。しかし、炉の長期運転を実行して早くその振る舞いを確認しておきたい事項ではある。

運転前の準備作業

燃料塩は、事前にフッ素化し脱水処理すれば、必要充分な純度にできる。また、燃料塩を注入する前の炉内壁の金属表面全体は、それまで空気に触れていた当然の結果として酸化皮膜で覆われているので、運転に際し、前もって脱水した純フリーベ熔融塩を注入して、酸化皮膜をその塩で洗い流し完全に除去しなければならない。酸化皮膜を残しておくと、金属容器内壁の腐食が進行するからである。このように処理した実験炉MSREでの経験によると、ハステロイ－Nの腐食は全く無視できる程度で、そのわずかな腐食量は、炉内の黒鉛材が運転前に吸着吸蔵していたと思われる微量の水分・二酸化炭素（CO_2）・一酸化炭素（CO）による腐食効果とほぼ一致した。したがって、黒鉛製造工程でのガス管理・高温減圧による脱ガスなどに注意をはらえば、腐食防止は充分である。

なお、実験炉MSREでは、実用炉では必要のない雑多な開発試験が行なわれたが、それ以上の腐食は無視できる程度であった。したがって、高温状態では燃料塩に外部からの吸湿など何らかの汚染が加えられる心配もなく、FUJI－IIの運転開始後の腐食は全く心配ないもの、と考えられる。

固体燃料炉では、炉心内の物質構成と構造を実物大で再現した高価な臨界実験装置によって必ず厳密に臨界量を測定し、それに基づいて燃料を製作装荷しなければならないが、その点、熔融塩炉は全く楽で、正確な臨界量を知らなくてよい。推定臨界量の約八五パーセントのウラン233を含む燃料塩をまず炉内に装荷し、次にウラン233を含む熔融塩を少量ずつドレイン・タンクを介し

て追加して、次第に臨界に近づければよい。

運転中の操作

初期のウラン233の必要量は約三四七キログラムだが、運転開始後の過渡期約四〇〇日間には、四五キログラムくらいの追加が必要となる。その後はほぼ燃料が自給自足状態になり、ウラン233の添加はほとんど不要だが、親物質のトリウムは一日当たり約四〇〇グラム（核分裂するのは三五〇グラム）の追加を要する。それには、フッ化トリウムとフッ化リチウムとの二元系塩を利用すればよい（基本となる溶媒熔融塩がフリーベ〔フッ化リチウムとフッ化ベリリウムの二元系塩〕なのに、ここでフッ化ベリリウムを使わないわけは、すぐ後で述べる）。ただし、トリウムの炉内保有量が二〇トンもあるので、追加は半年に一度くらいで充分で、追加されるトリウムの総量は約二・二トンに過ぎない。

ドレイン・タンクの項で説明したように、燃料塩は炉とタンクの間をゆっくり往復しているので、これらの化学操作が炉に急激な変動を加えることはない。

また、腐食その他の化学的振る舞いに異常をきたさないように、燃料塩の電気化学的状態は中性に保つべきだが、核分裂が進むにつれて少しずつフッ素が余分になり、酸化状態に移行してしまう。詳しい説明は省略するが、これに対しては三価のウランイオンがもつ柔軟な変動性バッファー機能が歯止めになる。ただ、長期的には金網に入れたベリリウム金属を燃料塩中に浸して調

整するとよい。このため炉寿命の間に約三五キログラムのベリリウムを随時添加することになるが、その結果として今度は、次第にフッ化ベリリウム濃度が増大する。このことは、先に述べたフッ化トリウムとフッ化リチウムとの二元系塩による一日約四〇〇グラムのトリウムの添加作業に伴ない、炉内にフッ化リチウムが加わってくることで、ほぼバランスがとれる。

こうして、総合的には一年に一度程度の簡単な組成の手直しによって、燃料塩は健全に維持できるのである。塩や炉の特性は、この程度の組成変動では問題にならないほど鈍感である。

柔軟性のある運転性能

以上から、FUJI-IIがいかに単純明快な条件下で、ほとんど手数を要せずに安定な運転保守ができるかを、理解していただけたかと思う。もし何らかの原因で炉が停止しても、常にキセノンガスを除去しているので、固体燃料炉とは異なり再起動は容易である。

また、使用電力が増えたり減ったり（負荷変動）するのに合わせ、簡単に出力の調整ができる（これを負荷追随性が高いという）、公共発電所として非常に使いやすい。

この「負荷追随性」でも、固体燃料炉は熔融塩炉に劣る。先に述べたように、負荷に対応して出力を変えると、固体燃料体内部の温度分布が激しく変化し、そうすると材質が劣化して、燃料耐久寿命が短くなるからである。

つまり固体燃料炉、すなわち今使用されているすべての原発は、繰り返しの話になるが、（一）

出力を変えると固体の燃料材料が傷むおそれがあり、なるべく負荷追随させたくない、(二)早い再起動は困難だから極力停めたくない、(三)建設費、投下資本が火力や水力発電所よりはるかに高額で、低出力では利子が高いものにつくから、なるべく全力運転を続けたい、という、一定あるいは全力出力で運転を続けるべき、柔軟性に欠けた施設なのである。事実、大変に稼働率が高い。それはそれでよいとしても、公共的発電所としてはあまり使い勝手のよいものではない。そのため現在は、もっぱらベースロード発電所(基本負荷を請け負うもの)として使われている。すでに述べたように、二〇〇一年、需要が最低になる正月の電力は、ほぼ九〇パーセントが原発でまかなわれた。

全世界では一般に配電施設が不充分で、僻地や離島も多いので、多数の小型原発炉が必要になるが、固体燃料の小型炉では、割高になるのみでなく、右の欠点を背負いかねない。

なお、FUJI-IIの炉内では常時クリプトン、キセノン、トリチウムを除去して、炉性能および安全性を大いに向上させているが、それ以外の化学処理は行なわない。

運転終了後の処理

炉寿命が終了した後は、燃料塩は化学処理工場をもつ地域センターに持ち帰られて化学処理され、塩はすべて核燃料サイクルに循環再利用される。

炉は一～二年冷却された後に、炉本体内部はそのままで、一次系・二次系の機器などとともに

施設から切り離されて、地域センターに持ち帰られる。炉室は適当な期間、残留放射能を減少させた後に、新しく全炉システムを再設置する。高温格納室内の作業はすべて遠隔操作なので、かなり短い冷却期間後に作業を開始でき、経済的である。

このように、燃料を含め炉を構成する物質は、原則としてすべて循環再利用する。したがって、廃棄物がどの程度出て、どう処理されるかについての解説は、FUJI－II炉のみではなく、燃料製作から再処理までの核燃料サイクル全体系の解説の中（第八章）で行なうほうがよいだろう。ここでは大まかな概説のみにとどめる。

燃料塩は、化学的に邪魔な一部の核分裂生成物（たとえばキセノンガスなど）を除き、生成する放射性元素類をできるだけ燃料サイクルの中に残し循環消滅させるのを原則とする。それがどの程度の量になるのかは、表7－2（165頁）を参考にしていただきたい。生まれるプルトニウムは、八〇〇グラム程度とごくわずかな問題にならない量なので、塩中に残す。

減速材の黒鉛は表面層を〇・一ミリ程度削ると放射能は無視できるので、炉中心部で使った黒鉛を除き、炉壁を守る中性子反射遮蔽体などに可能な限り再利用する。

容器材料のハステロイ－Nは、中性子が強く当たらないよう右の反射遮蔽体で守られているので、浴びた中性子との反応で生まれた誘導放射能は約一年後には低くなる。したがって、表面汚染部を削り取った上で真空熔融し、一次系炉材として全量再利用できるだろう。

運転保守作業は極端に少なくなるので、核燃料物質が関わらない低レベル放射性廃棄物の排出

量は、おそらく軽水原発の一〇〇分の一くらいに減少するだろう（ただし、ヘリウムガス系の活性炭素ベッドなどは、高放射性で特別な処理が必要である）。

いずれにしても、プルトニウムなどの超ウラン元素類の発生が無視できるのと、燃料塩が少々不純物（核分裂生成物）で汚染されても再利用できる液体核燃料炉であることは、廃棄物問題を大きく改善させる。

放射性廃棄物の消滅や最終処分も大きく改善できるが、それは次章で解説する。

高い安全性

この炉は本質的に「重大事故の恐れのない炉」である。しかも、既存の炉と同様に厳重な三重の防護壁（炉容器壁・高温格納室・炉格納建屋（たてや））をもっている。「既存炉では五重の防護である」と主張されることがあるが、加わるのは脆弱（ぜいじゃく）な「燃料ペレット・燃料被覆管」に過ぎない。

これは「常圧系」であり、ポンプ出口がせいぜい三ないし五気圧になるのみである。また、固体核燃料の金属被覆管のような、薄肉脆弱で高圧・高放射線照射といった苛酷な条件に曝される防護壁はない。FUJIでは核反応および熱除去の設計全体に充分余裕があり、無理がなく、運転保守作業が少なく、さらに、燃料塩は化学不活性・照射損傷皆無・常圧であり、五〇〇度以下では安定なガラス固化体になる。このガラス固化体は、放射性廃棄物の閉じ込めに最良である（ただし長期の貯蔵には管理上の注意が必要）。ガラス固化体が、燃えもせず水にも溶けない物質で

あることも、安全性を高めている。
常圧で単純な構造体であるから、炉が破損し燃料塩が漏洩する確率は充分低いであろうが、仮に燃料塩が漏れても、核燃料が炉内からなくなると炉が自動停止するだけだし、燃料塩自体も炉から出たら中性子が減速されず臨界とならず、安定なガラス固化体になるのみで、問題はない。
発電所の外の一般住民に対する安全性に関しては、常に「ガス状放射性物質を除去」(164頁「核分裂生成物の振る舞い」の項参照)しているので、事故時のそれらの放出量を最小限にできる唯一の炉型である。中間熱交換器で漏洩があっても、二次冷却材塩中のホウ素が燃料塩中に入り、その大きな中性子吸収で炉が停止するのみである。
発電用の水蒸気は高圧だから、二次冷却材塩中へ水が微量漏れる可能性はあるが、そうした事態は、二次冷却材塩中でのフッ化水素ガスの発生で簡単に検知できる。また、二次系が異常に高圧になれば、破裂板を利用して自動的に水を放出すればよい。
さらに、軍事攻撃・テロ・組織内暴力(サボタージュ)・地震・津波などを受けて破壊されても、大災害へ結びつくことが考えられない唯一の炉型だろう。それは、種々の事態においても、既述のように、燃料塩の漏洩が重大事態を招かないからである。しかも、エアロゾル・ダスト(煙霧状物質)を発生しないのも安全性を高めている。
福島原発で起こった「非常電源喪失」といった事態への対応についても、一言述べておく。
このような緊急事態が発生した場合には、原子炉下部の緊急バルブ(落下弁)が(炉の運転時

は冷却して凍らせているが、冷却が止むと融けて自動的に、つまり電気の力を借りずに）開き、原子炉内の燃料熔融塩をすべて、地下の冷却水プール内の銅製容器内に落とす。塩は容器壁を濡らさずほぼ完全に、短時間で地下に移行する。

最初に手掛ける小型のミニ（mini）ＦＵＪＩ炉を例にすれば、その地下には約一〇〇立方メートルの容量の水プールがあり、約一立方メートルの容量を持つ銅製の容器の約半分を燃料塩が占めることになる。この塩は核分裂物質を含んでおり発熱するが、その冷却は「無電源水蒸気冷却凝縮器」で対処できる。そのうちに発熱量は低下し、自然放熱で間に合うようになるであろう。もし、ドレイン系統が破壊され機能しない場合にも、漏洩した燃料塩は、融点五〇〇度以下に放熱冷却させるのは容易なのでガラス固化分散し、対処はたやすい。揮発成分や水溶解成分をほとんどもたないからである。事実上、環境に放出する放射性物質はごく微量である。

なお、言うまでもなく詳細な「安全性解説」を聞かされなければ、皆さんも真の安全評価は下せまい。ここではこれ以上安全性についての解説を加えないが、「原理的に安全」であることは、広く専門家によっても認められている。その最大の論拠は、事態が深刻になれば既述のように、「緊急ドレイン（排出）」により自動的に炉を停止できることにあるといってよいであろう。

安全性の追求から人間が全く手を触れない全自動的原発を提案する人もいる。しかし、ブラックボックス的な全自動装置は、一見原理的に安全に思えても、テロ攻撃などを含む予想外の事態に臨機応変に対応できず、致命傷となるケースが多い。装置は人間が親しんで使うものである。

内容・状況を常によく理解しつつ手塩にかけてこそ、装置は安全に最もよく働く。人間は働くことを楽しむ者である。我々の炉程度の「軽作業」で、「より良い」装置が重大事故の心配なく安全に運転できるなら、それこそ理想ではなかろうか。

ここでいう「より良い」とは、「貴重な中性子を無駄にせず、最も単純で高性能の核燃料サイクルが作れる」という意味である。全自動的原発は、一般にこの理想から遠いものである。

圧倒的に有利な経済性

この炉の「高温格納室」のみは新しい技術だが、他の炉本体・安全装置などは単純そのもので、既存の技術で対応できる。運転・保守・燃料サイクルの維持など全体的な作業は、単純かつ軽量になる。炉寿命までの間、燃料塩は全く取り替えずトリウムなどを追加するのみで、初めに装荷した三七〇キログラムの核分裂性物質ウラン233の約五倍量を、連続的に核分裂させ燃焼させることができる。燃焼率は五〇〇パーセントといってよい。

固体燃料炉では、核燃料を装荷してから取り出すまでの一回の燃焼率は数十パーセントに過ぎない。さらに、その固体燃料体の製作・検査・輸送・燃焼・化学処理・再製作などの作業量と繰り返し回数を考えれば、FUJI-IIが経済的に圧倒的に有利なのは明らかである。

関連するインフラストラクチャー（産業社会基盤）が単純になる経済効果も大きい。これまでのウラン-プルトニウム系固体燃料炉では、特に安全保障上の「管理社会化」的負担、たとえば

特殊管理を要する核物質や核燃料体遮蔽容器等の路上・海上輸送などの負担が、直接・間接に経済性にのしかかっていたのだが、それらが大きく軽減できるだろう。
真の経済性評価は、全システムが大規模に実用化された後にのみ行ないうるが、その有望性に疑いはなかろう。しかも、基本技術の基盤はすでにあり、今後の研究開発費はわずかですむ。実用化が始まった後の、さらなる改善の余地も多大である。

超小型実験炉を早急に造ろう

すぐにでもFUJI-IIそのものを造って運転してみるべきだ、との意見も少なくない。しかし、なにぶん実験炉MSREが運転されてから四〇年が無駄に経過し、関係者はほとんど亡くなっている。中核となるべき専門家・技術者が二、三〇〇人は必要だが、それだけの人材を急には養成できない。そこで、その養成のため、基本技術の再確認と包括的な技術習得の場として、「超小型の熔融塩発電炉」建設計画を立てている。今一番必要なのは、炉の全寿命間におよぶ運転体験である。見落とし・錯覚などの失敗を避けるためにも、一刻も早くこの炉型を運転し、実証・再確認し、技術を成熟させたい。
今から十数年でそれは可能と考えている。まず「超小型熔融塩発電炉」ミニ(mini)FUJI(七〇〇〇キロワット発電)を実現し、現実に見てもらいたい。その概要は表7-1(154頁)に、炉本体の寸法は図7-2(155頁)に示した。大略はオークリッジ研の実験炉MSREに近い。一

番大きな差は、MSREでは発電にまで研究開発が及ばなかったが、ミニFUJIでは発電系まですべてを実証することである。なお、MSREでは、FUJI全寿命期間の三分の一量相当の核燃料燃焼をすでに実行している。なお、MSRE計画での直接の人員は、運転最盛期で運転員を入れて約二三〇名だった。ミニFUJIを足場に、まず一〇〇〇人、ついで一万人くらいを順次養成し、多数の炉を展開したい。

この第一期計画は、米国サンタモニカのランド（RAND）研究所で一九九七年春、世界八カ国およびIAEAより二四名の専門家を集めて行なわれた討議の場で、妥当であるという明快な支持を得ている。

なお、その実際の運転開始までには六～七年が必要である。前記のように、基本技術の整った計画ではあるが、科学者・技術者たちの基礎訓練を含む燃料塩・冷却材塩の炉外循環系の実験、構造材料の高温強度データ取得、構造材料と黒鉛の照射損傷データ取得、炉構造体の実物大模型の炉外試験などが、改めて必要だからである。

ミニFUJIでは濃縮ウランで始動させるであろうが、途中でプルトニウム燃料による実証運転も行なうであろう。なお、実験炉MSREでは、すでにプルトニウムの燃焼も一部実施している。

ミニFUJIが順調に運転を開始したら、並行してウラン233を燃料とする標準的小型発電炉「FUJI-U233」、およびプルトニウム燃焼型「FUJI-Pu」の建設計画が進められるだろう。

前者はFUJI-IIの設計を発展させたものである。後者では、ウラン233の代わりにプルトニウムが装荷されるが、その核分裂反応の過程で、熔融塩中のトリウム232から次第にウラン233が生まれ、次のFUJI-U233炉の核燃料となる。

なお、プルトニウム含有核燃料塩は、既存原発の使用済み核燃料から、簡易化FREGAT法（前章参照）を利用して調達される。FUJI-Puの実用化段階までには、その化学処理法の完成は容易である。ロシア・チェコ・フランスのエンジニアたちが協力を約束してくれている上に、資金はわずかでよいからである。

このミニFUJIおよびFUJIを中心とする小型発電炉開発計画は、国際協力で進めたい、また進めるべきである。将来、全世界のエネルギー問題の解決に役立つのでなければ、この炉は無意味になるからである。ただし、船頭多くしては非能率であり、日本・チェコ・米国の三国を中心とし、それにすでに関心の高い諸外国から一〜二名ずつ研究員を受け容れて推進したいと考えている。参加の意志のある国は少なくとも、インド・フランス・ベラルーシ・ブラジル・カナダ・英国などである。最近はベネズエラ・トルコ・韓国・オーストラリア・中国・シンガポールなどでの関心が高まっており、中国は二年来強力に接近してきた上、今年（二〇一一年）になって上海を中心とした「国家開発の開始」を宣言している。日本国内の関心も急速に高まっている。国際協力の実績はすでに膨大である。

第八章　核燃料を「増殖」する

世界の環境保全と人口爆発・貧困などの問題を解決するには、
それに見合う膨大な核エネルギーを急ぎ確保しなければならない。
その確保のポイントは核燃料の「増殖」にある。

核エネルギーが主役になる条件

核分裂エネルギーが主役となる条件は、45頁図1-2（D）を眺めて知ることができる。まず、
（一）過去の発電実績（約二〇億キロワット・年）の五〇〇～一〇〇〇倍の巨大な発電総量（最大時の設備規模は数十億キロワットで二〇～三〇倍）が必要である。しかも、
（二）総発電量を倍増時間率約一〇年で急速に増加させ、世界に展開しなければ無意味である。早く化石燃料と置き換えなければ、地球環境は救えないからである。そして、
（三）二〇六〇年頃には成長速度を落とし始め、二〇八〇年頃からは規模の縮小に入る。

これら（一）～（三）については以下でもう少し補足するが、いずれにせよこのすべてを満たさなければならない。あまりに苛酷な要求と感じる人がいるかもしれないが、妥協の余地はない。なぜなら、これに成功しても大気中への二酸化炭素の年間放出量は増大を続け、二〇六五年頃に現在の二倍になってやっと揚げ止まる（図1-2〔C〕参照）。したがって、いくら苛酷でも、この巨大な核エネルギー産業育成の失敗は許されない。いや、それどころか、おそらくまだ不充分で、平行してさまざまな環境対策、たとえば省エネルギーの促進、炭素税政策の実行、太陽エネルギー利用促進などの努力が必要だろう。事態はそこまで悪化している。

将来、世界が必要とする全エネルギーの半分を供給しようとするのだから、これは〇・一か一京（一万兆）円規模の超巨大産業の創設を意味する。こう言うと、「ウラン-プルトニウム核燃料サイクルをここまで立ち上げるのに、どれだけの資金を積み上げたことか。またそれを繰り返

せ、と言うのか」と、核エネルギー関係の先輩方からよく反撥される。気持ちはわかるが、そうではない。もうあまり開発資金を必要としないのである。

日本政府が今唱えている高速増殖炉計画を遂行するには、おそらく数兆円では済まず、また数十年が必要であり、しかもプルトニウムをばら撒くことになって、世界に展開できる目算はない。このトリウム熔融塩炉計画はその何分の一かの資金でよい上に、安全性の面からも経済性の面からも、全世界に京円規模の新産業が展開できるのである。

それにしても、現在までにすでに原発を軸とした入念な産業社会基盤（インフラストラクチャー）が用意されてきたのは貴重である。この既存投資を全面的に利用すれば、図1-2の（A）または（D）に示したような円滑な移行が期待できる（230頁図10-1参照）。

一〇年ごとに倍増を

総発電量を一〇年ごとに倍増させるような急速な産業発展は、石油や天然ガス産業でも起きたことで、そのようにしてエネルギーの主役は移り変わった。「政府の指導で」ではなく、「民間活力のみの働きで」といってよい。経済的有利さが誘導したのである。ただし、それ以上の速さでは、社会とのミスマッチを誘発し混乱を招くだろう。過去の原発産業がまさにそうした例である。

核科学技術に対する超巨大な軍事投資が世界的に行なわれ、核エネルギー利用を促進したが、その結果民生用に起こった、図1-2（A）の実績曲線が示すようなあまりにも急激な成長が、ス

リーマイル島やチェルノブイリ、福島の事故を誘発し、自らの首を絞めたのである。異常に早過ぎた展開が、それに続く全くの停滞という現状をもたらしたのである。

さて、総発電量を一〇年ごとに倍増するための新しい技術構想を本章で紹介するわけだが、その説明の前に、その技術構想は主役の座を次の太陽エネルギーに明け渡すことまでをも見通したものであることを指摘しておきたい。

これからのトリウム利用巨大産業は、頂点に達した途端に縮小後退を開始すべきである。人間の作るものも、個々の人間自身も、時の流れとともに消えてゆく。ものごとには興きて滅びるから次がある。図1-2(A)にもそれが示されている。

しかし、意味する内容は重い。この後退期を利用することによって、最後に残された課題の「放射性廃棄物の処分」が実行され、解決される。このことは本章の終わりでもう一度触れる。

なぜ「増殖」が必要か

急速に発電量を増やすには、必要とする「火種」の核分裂性核種の膨大な増殖を果たさなければならない。増殖しないと、炉の急速な展開に火種の供給が追いつかなくなるからである。

ここまで述べてきたように、火種となれる(つまり容易に核分裂を起こす)物質は限られている。天然ウランでは、火種となるのは含有率〇・七パーセントのウラン235のみだが、その核分裂で生まれる中性子を上手にウラン238(天然ウランの九九・三パーセント)に吸収させれば、消費する

ウラン235の量以上の火種のプルトニウム239・241が「増殖」できる（139頁図6-2参照）。トリウム自体は火種ではないが、親物質トリウム232（天然トリウムのほぼ一〇〇パーセント）に中性子を吸収させることで（その中性子を発生させる火種は、図6-2のようにウラン233でもウラン235でもプルトニウム239でもプルトニウム241でもよい）、消費する量以上の火種のウラン233が「増殖」できる。

ただし、ウラン238から火種のプルトニウム239・241を増殖するのは、望ましくない。いうまでもなくプルトニウムは、核兵器の原料であり、膨大高価な安全保障措置の対象となり、核廃棄物ともなって、始末に困るからである。ともあれ、いずれにせよ、核分裂エネルギー利用を目指すかぎり「増殖は必須」なのである。

では、効率的に増殖するにはどうしたらいいか？

これまでは、ウランの利用であれトリウムの利用であれ、同一炉内で発電をしつつ効率的増殖も狙う「増殖発電炉」というものを開発しなければならない、というのが、関係者の常識・鉄則であった。ウラン-プルトニウム核燃料サイクルでその役割を担うのが「もんじゅ」のような「高速増殖炉」であり、トリウム-ウラン核燃料サイクルでは、米国オークリッジ国立研究所が提案した「熔融塩増殖発電炉」である。しかし、開発から四〇〜五〇年を経て、同一炉で「増殖」と「発電」の二兎を追うのは全く間尺に合わないことが明らかになってきた。私自身も三〇年前までは熔融塩増殖発電炉が最良と考えていたのだが、そうした形での増殖は実は幻想である

と気づいた。理由を以下に示す。

（a）増殖能力が不足――前記の（一）（二）の条件を満たして、約一〇年で総発電量を倍増させるだけの能力は、増殖発電炉にはないのが見えてきた。

高速増殖炉では、五〇年間の先進諸国の莫大な投資によっても、実用炉で発電量を倍増させる時間を、三〇年以下に短縮できる見通しは得られなかった。唯一の実用炉だったフランスの一二〇万キロワット高速増殖炉スーパーフェニックスでは、約一〇〇年かかる。

熔融塩増殖発電炉では、実質的な核燃料倍増時間は約二〇年で、高速増殖炉よりもあらゆる意味で優れているが、まだ能力不足である。必要なのは、世界の総発電量を一〇年ごとに倍にすることで、仮に炉の設計性能を一〇年で倍増させるだけのものに仕上げたとしても、まだ及ばない。余裕をもってそれを六～七年くらいにしなければ、全体系の総発電量の倍増時間を一〇年にはできないからだが、そのようなものの経済的実現は全く不可能である。

（b）大型化と高い発電コスト――増殖発電炉よりも単純な軽水原発でさえ、コスト競争で火力発電所に抗しきれなくなった。増殖発電炉が高い増殖能を狙って中性子の利用効率を高めると、必然的に大型化し複雑高価な発電炉となる。化学再処理などを含んだ核燃料増殖サイクル全体を整備すると、発電コストがより高くなるのは自明である。

しかも、全世界では多数の小型炉も必要である。小型で低増殖能となった発電炉が混ざると、全体系の倍増時間は急速に長くなるから、世界的に利用展開するのは不可能となる。

（c）不利な開発コストと開発期間――この理由はほとんど（b）と同様で、難問続出である。結論として、とても二一世紀に役立つ見込みはない。現に、世界のほとんどの国は開発を断念した。主として経済性の低下からの断念だったが。

熔融塩増殖発電炉の技術的難点

熔融塩増殖発電炉について、もう一、二述べておこう。これには、「炉心黒鉛の四年ごとの取り替え」という大きな弱点があるのである。増殖性能を高めるには、入れた核燃料を早く燃やし、その「世代」を短くしてやらなければならない。一～二ヵ月で子を産む世代交代の早い鼠と、遅い象とで、増殖速度に違いが出ることを思い出していただければよい。その結果、中性子照射損傷が強まって、黒鉛が早く劣化してしまうのである。その際の、炉の蓋を開けての黒鉛の取り替えは、熔融塩を固まらせないための高温下、強い放射線のもとでの作業となって、大変である。これでは、せっかく液体の核燃料を使う利点が半減する。

さらに熔融塩増殖炉では、一次燃料塩系に「連続化学処理装置」というものが必要になる。増殖したウラン233をこの装置で、ただちに分離するためである。この「連続化学処理をする」という点で、確かに熔融塩増殖炉は、高速増殖炉より数段優れている。なぜなら高速増殖炉の場合には、燃焼が進んだ固体燃料体を炉心から取り出した後、一年間ほど放射能を弱めてから、増殖したプルトニウムを化学再処理を行なって分離し、改めて固体核燃料体を製造・運搬し、入れ替え

なければならず、燃料再使用に要する時間が非常に長くなるからである。
しかし、これは利点でもあるが弱点でもある。この装置の技術開発は、炉本体よりはるかに困難である。化学処理を実施するには燃料熔融塩を酸化や還元しなければならないので、塩の化学的中性が保てず、容器材料の腐食対策がはるかに厳しいものになるからである。
これらの補助施設は高価であるから、コストを吸収するためにどうしても炉は大型化する。しかも、倍増時間は前述のようにまだ二〇年なのである。間に合わない。

有効な増殖方式は？

では、増殖はどうするか。発電所のほうはＦＵＪＩ－Ⅱで充分理想的なのだから、それとは別に核燃料増殖専用の施設を造るのがよい。発電と増殖の二兎は追わないのである。
増殖に役立つ主要な核反応を調べてみよう。ポイントはどれだけ多くの中性子が入手できるかにある。対象となるのは核分裂・ＤＴ核融合・核スポレーション反応の三種であり、それらの主要特性の比較は、すでに表４－１（107頁）に示しておいた。
繰り返しの説明となるが、中性子入手という面に絞ると、核スポレーション反応が特に優れ、核融合反応はやや優れていて第二の候補であるが、まだ物理的基礎さえ不充分である。核分裂反応は得手でなく、この反応で良い増殖炉を造るのは困難なことが、この表からも読みとれる。
したがって、核スポレーション反応をどう増殖に利用するかが、ポイントとなる。

核スポレーション反応は、第四章で説明したように、一〇〇〇から三〇〇〇MeVくらいに水素原子核（陽子）を加速して重い原子核に衝突させ、多量の中性子を放出させる反応である。余談だが、この名は発見者の米国のローレンス博士がつけたもので、「核破砕」を意味するが、後に明らかになった反応内容から見て、適切な用語ではない。したがって、カタカナ名の利用を奨めている。

この反応はきわめて複雑である。主要プロセスを、ドイツのユーリッヒ研究所の研究者が作った図8-1（次頁）を借用して解説しておこう。原子核は陽子と中性子が混ざり合った液滴のようなものだが、高エネルギーをもった陽子がそうした重い原子核に衝突すると、核にめり込んで核の温度を高め（励起し）、そこから多数の「中性子が蒸発」して放出される。これが主反応といってよいだろう。また、多くの中間子の発生があり、励起された核の部分破壊や高速中性子による核分裂などが起こり、これらの反応からも中性子が発生する。純粋なトリウム金属に入射すると、一〇〇〇MeVの陽子一個当たりで、平均約四〇個の中性子が発生する。

このような反応を熔融塩中のトリウムなどの原子核との間で行なわせ、発生した中性子を周りに多量にあるトリウム原子核に吸収させて、ウラン233核燃料を増殖するのである。

その際、生み出されたウラン233が円滑にFUJIで使用され、核燃料サイクルが上手に循環するように工夫すべきである。その工夫とは、同じ系統のフリーベ系熔融塩を全システムで使用し、分離抽出などの中間操作を最小限に抑えた単純な熔融塩核燃料サイクルを構築する、ということ

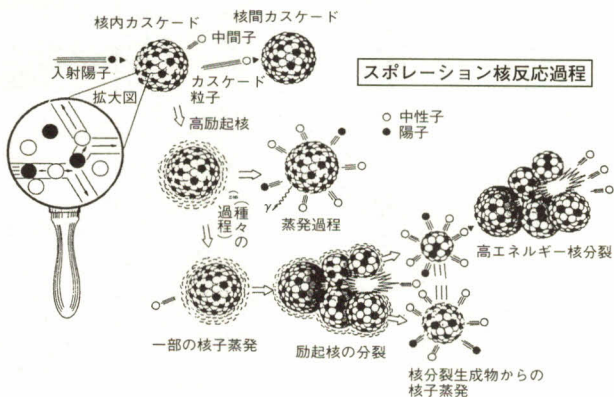



図8-1　核スポレーション反応の高エネルギー領域のみの概念図（Bauer）

である。

「加速器熔融塩増殖炉」の提案

右の目的のために、友人の故塚田甲子男・中原康明氏の協力を得て、日本原子力研究所（現・日本原子力研究開発機構）で発明した（一九八〇年）のが、「加速器熔融塩増殖炉」である。これは「大電流陽子加速器」と、図8－2（左頁）に示したような「熔融塩増殖反応装置」から構成されている。

反応熱を処理するために発電施設も備えているが、あくまで目的は増殖で、発電所と考えるべきではない。その電力は主として加速器運転に使われる。

大電流陽子加速器は、二〇〇ミリアンペア相当の陽子のビーム（流れの束）を一〇〇〇MeV（一〇億電子ボルト）に加速する。すでに、

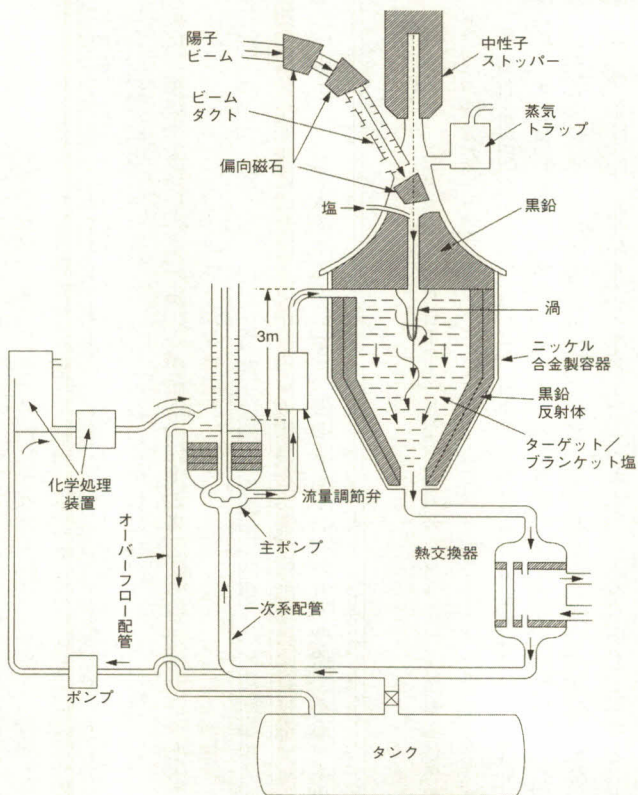



図8-2　加速器熔融塩増殖炉の熔融塩増殖反応装置の概念図

一ミリアンペアの加速器が米国ロスアラモス国立研究所で約四〇年前から稼働しており、今、日本でもJ-PARC（大強度陽子加速器施設）で一〇ミリアンペアクラスの開発が始まっている。一〇年後には加速器熔融塩増殖炉の開発に着手し、FUJIの核燃料を製造したいと考えている（それまでは処分に困っているプルトニウムを初期核燃料に利用する。第七章参照）。できれば、陽子の速度は不揃いでもいいから、もっと単純かつ工業的で、より経済的な陽子加速方式が開発できるとよい。プラズマフォーカスも長年検討している。

この陽子ビームは図8-2の円筒容器（熔融塩増殖反応装置）内の熔融塩に入射する。円筒容器は四・五メートル径で七メートルくらいの深さをもち、熔融塩は上部に数十センチの深さの渦をもつ。陽子ビームが入射するのは、その渦の少し中心を外れた位置である。中央は流れが遅く、発生した熱の分散に不利だからである。核反応が一番激しい領域は、液面下約一メートルのところである。

ターゲットとなる熔融塩は、FUJI-IIなどと共通なフリーベ系熔融塩核燃料である。ただし、トリウム成分をより濃くして、それと陽子との核スポレーション反応を有効に進めさせる。なお、核融合とは違い、ここでは物理的に不明で困るような課題は残っていない。

高速粒子を含む放射線に照射されるのはこの熔融塩のみであり、照射損傷の心配は無用である。熱除去も問題はない。生成物は自然に混合拡散して、固体におけるような局所滞留の心配はない。陽子入射口技術は、ロシアの友人が開発したガスカーテン法を利用し、固体窓などは使わない。

したがって実用化に当たって、加速器開発以外に大きな問題はない。

「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」構想

以上で準備が整った。45頁図1-2(D)の要請を実現できる核発電システムを、「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」と名づけた。ここまでの解説でおわかりのように、これは次の三原則に従う。

第一原則――固体ではなく液体のフッ化物熔融塩核燃料を使用

炉は一種の化学工学施設だから、作業媒体に液体を利用するのが原則である。ここではフッ化物のフリーベ系熔融塩を使う。核反応・熱輸送・化学処理媒体としての三機能を兼ねる。これを利用した炉技術の基礎は、米国オークリッジ国立研究所で充分に整えられている。また、燃料塩の物理化学的(電気化学的)特性の予測が容易であり、理論的合理的な技術開発が可能なことが実績からも証明されている。

第二原則――ウランではなくトリウムを利用

トリウム232のみからなる天然トリウムに中性子を吸収させて、核分裂性のウラン233を作り、火種として利用する。トリウムからはプルトニウムなどの超ウラン元素はほとんどできない。トリウム資源は充分に存在し、独占されることはない。

第三原則――核燃料増殖施設と発電炉との組み合わせで核燃料増殖サイクルを完成

理想とされた「増殖発電炉」は幻想だった。高速増殖炉およびオークリッジ研が推進した熔融塩増殖炉などは、大型かつ複雑高価な炉となり、しかも増殖性能が不足で全世界には展開できない。そもそも発電所は、充分に単純・安全・経済的で小型化もできる公共的施設でなければ、世界のエネルギーの数十パーセントをまかなうまでには普及できない。また、発電炉自体は核燃料自給自足型であるのが理想である。炉特性の変動や核物質の輸送量が最小にできるからである。この発電炉FUJIとは別個に、核燃料増殖生産工場として「加速器熔融塩増殖炉」を準備し、両者を組み合わせて「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」を完成させる。

これで「貴重な中性子を無駄にしない最も単純な核燃料サイクル」が完成し、世界にエネルギーを提供できるだろう。

この全システムを構成する施設は、以下の通りである。

(一) 熔融塩発電所〔需要地の近くに設置〕

FUJI-IIを原型とするウラン233燃焼型のFUJI-U233、プルトニウム燃焼型のFUJI-Puなどである。その発電容量は目的に応じて変えることができる。せいぜい五〇万キロワットまでの二〜三種類を標準化し、必要に応じて複数個の炉を併設(モジュラー化)するのがよいだろう。この炉型は小型化に適し、炉本体は工場生産できる。

(二) 加速器熔融塩増殖炉〔地域センターに集約〕

これは工場相当の施設なので、世界に二〇〜五〇カ所くらい設けた地域センター内に数基ずつ

設置され、集中的に運転管理される。核物質の取り扱い管理も含め、特殊な専門要員や補助装置を共有できよう。

(三) 化学処理・炉機器解体および廃棄物処理工場など〔地域センターに集約〕

これらも(二)と同様に地域センターで集中管理される。

こうした諸施設が、単一種類のみのフリーベ系熔融塩核燃料を共有して連結され、多機能を協働的に果たしているのが「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」である。

まず、プルトニウムも含んだフリーベ系熔融塩核燃料が発電炉ＦＵＪＩに運ばれ、化学組成を調整した上で装荷され、運転発電される。一発電所には原則として二基以上の発電炉が置かれ、故障時に補い合う。一地域センター単位では、約一億キロワット分（現在の日本の総発電量の半分程度）の発電が行なわれる。寿命を終えたＦＵＪＩは解体され、炉本体や一次系機器類および核燃料は地域センターに搬送される。

使用を終え回収された熔融塩核燃料は、まずフッ素ガスで処理され、すべてのウラン成分がフッ化ウランガスとして分離される。このフッ化ウランを加速器熔融塩増殖炉から汲み出した塩に添加して、再度発電炉ＦＵＪＩに熔融塩核燃料として送る。ウランを除かれた残りの熔融塩成分のうち、一部の邪魔な核分裂生成物は、化学処理して分離され、将来の消滅処理のために保管され、一方、支障のない生成物は塩から分離せず、そのまま残す。

そうやって核分裂生成物を残した使用済みの塩は、リチウム・ベリリウム・トリウム（プルト

ニウム）のフッ化物が主体で、これは加速器熔融塩増殖炉の塩タンクに加えられる。発電炉ＦＵＪＩの場合と同様に、加速器熔融塩増殖炉内の塩は、塩タンクと増殖反応装置とを緩やかに流通往復していて、ウラン233を分離された塩を希釈用に添加することで、反応装置中で作られ濃くなってくるウラン233の塩中濃度を常にほぼ一定に保つ。

塩中に残していた核分裂生成物は、加速器炉から塩が汲み出される際に、一緒に汲み出され、燃料塩の一部として発電炉内へ戻る。こうして生成物は、核燃料サイクル内で、加速器炉や発電炉を循環しつつ、次第に放射能を消滅する。化学分離などの無駄な作業は、わずかに汚染した低レベル放射性廃棄物を増やすだけなので、極力減らす。

放射性廃棄物の消滅

核分裂で生まれる放射性元素の処理について、もう少し具体的に触れておこう。表８－１（左頁）をごらんいただきたい。

三〇年以上の半減期をもった核分裂生成物の中で、表８－１に示されたＡ、Ｂ群は、右に記したように、燃料塩中に溶解しているので塩中に留め、燃料塩サイクル内を循環しているうちに次第に消滅させる。特にＡ群は、ＦＵＪＩの塩中で熱中性子を吸収して安定な核種になり、より有効な消滅処理が進むだろう。Ｂ群の放射性同位体は、加速器熔融塩増殖炉内の高エネルギー中性子により放射能が消滅する。

表8-1　約30年以上の長寿命放射性同位体の消滅処理

分類	放射性同位体	半減期(年)	熱中性子吸収断面積(バーン)*
C	ニッケル59	75,000	93
C	ニッケル63	100	24
B	ストロンチウム90	29	0.9
B	ジルコニウム93	1,500,000	2.5
C	ニオブ94	20,000	15
C	テクネチウム99	210,000	20
C	パラジウム107	6,500,000	1.8
C	スズ126	100,000	0.14
A	ヨード129	16,000,000	27
A	セシウム135	3,000,000	62
B	セシウム137	30	0.11
A	サマリウム151	90	15,200

*バーンは断面積の単位で$10^{-28}m^2$

塩に溶解しない金属性の放射性同位体C群は、化学処理して集めてから加速器熔融塩増殖炉のプールに黒鉛の容器に入れて沈め、高速の中性子による消滅が図られる。

ただし、これらの消滅作業を積極的に実施すると、その消滅に使われた分だけ中性子が核燃料増殖に回らなくなる。発電炉FUJIも加速器熔融塩増殖炉も柔軟な設計性能をもつので、消滅作業が炉の運転に支障をきたさないようにはできるが、中性子が貴重な時期、すなわち45頁図1－2（D）の曲線が立ち上がっている時期には望ましいことではない。二一世紀末近く（二〇七〇年以降）の「後退期」まで、一部は分離貯蔵しておいてから消滅させるのがよい。

この後退期には、軽水原発などから出る核廃棄物がまだ多量に保管されて残っているだろうが、これらも引き受けて発電炉FUJIや加速器熔融塩増殖炉で消滅させることができる。後退期に入れば、ウラン233などの核燃料が余分になり、積極的に消費し消滅させなければなら

ないが、これら核燃料を核分裂させて得られた中性子が、積極的に核廃棄物の消滅作業に使え、一石二鳥である。

このような作業にフッ化物熔融塩が最適な作業媒体であることは、もうよくおわかりだろう。すでに提案したように、FREGAT方式で使用済み固体ウラン（あるいはプルトニウム）燃料をフッ素化処理すれば、廃棄物はフッ化物となり、容易に処理できるのである。「万年問題」といわれた核廃棄物対策が、「百年問題」に還元できたことになる。

必要資源と廃棄物

トリウム熔融塩核エネルギー協働システムでは、プルトニウムなどの超ウラン元素がほとんど生成せず、それらによる廃棄物の汚染は軽微なので、核物質を主体とした高レベル廃棄物の量は大きく減らせるし、他の放射性廃棄物も、先で取り上げたように、大部分は積極的に消滅できる。そうすると、残るのは、中性子を吸収して少し放射能化汚染した構成材料の廃棄問題である。

図1-2（D）に示したように、全世界で約一兆キロワット・年の積算量の発電をこの協働システムで果たしたとすると、必要な物量は表8-2（左頁）のようになると考えられる（ただし、かなり余裕をみてあり、実際は今後の工夫でまだまだ減らせるだろう）。参考までに、オークリッジ研の熔融塩増殖炉を利用した場合の物量も示してある。

トリウム資源に問題はない。残渣（ざんさ）一二〇万トンはもっと減らせるだろうが、これでも一辺一〇

表8-2　約1兆キロワット・年の発電に必要な物資量
（熔融塩増殖炉との比較）

	トリウム熔融塩 核エネルギー協働システム	熔融塩増殖炉 （ORNL）
トリウム消費	200万トン	530万トン 〔80万トン核分裂〕
燃料塩	70〜200万トン	600〜1100万トン
活性炭	240万トン	240万トン
黒鉛	1800〜2200万トン	5700万トン
ハステロイ-N（高放射能）	2000万トン×（1/3）	1800万トン×（1/3）
（低放射能）	8400万トン×（1/10）	4600万トン×（1/10）
低レベル放射性廃棄物	900万m³	9000万m³

〇メートルの立方体の容積に過ぎない。また、この残渣は化学的に安定な化合物である。

燃料塩物質の必要量は、最大に考えてリチウム六〇万トン、ベリリウム二〇万トン、フッ素二〇〇万トンである。これらはみな安定な化合物を形成し、ガラス固化体にも変えやすい。

活性炭は機械的に積算すると二四〇万トンになるが、数十年間には吸着させた放射性ガスの放射能は充分減衰するので、再利用により廃棄量は一〜二桁少なくできるだろう。

炉内の黒鉛は表面を〇・一ミリ削ると汚染が除けるので、かなり再使用できる。いずれにしても充分安定な物質で、保管は容易である。

ニッケル系構造材のハステロイ-Nは、一年間放射能を冷却すれば取り扱えるようになるので、真空熔融して炉材料用に充分再利用できる。しかし、最終的には表に示したくらいは残るだろう。微量添加するニオ

ブから生ずる放射性ニオブ94の半減期が二万年だからである。
低レベル放射性廃棄物の総量は、保守・化学処理作業が少ないので、大きく減るだろう。また、超ウラン元素でほとんど汚染されないので、経済的な脱水・乾燥・焼却や化学処理による容積減少も容易だろう。日本では青森県六ヶ所村に、ドラム缶三〇〇万本分の低レベル放射性廃棄物の埋設センターが用意されつつある。これらの廃棄物は三〇〇年後には放射能が無視できるようになるが、新しい原発が大規模に使用されても、これ以上の準備は不要であるのを期待したい。
なお、化石燃料時代から核エネルギー時代に移るというのは、燃料物質の輸送作業量が年間一兆トンから一〇〇〇万トンの水準へと、少なくとも一〇万分の一に下がることを意味する。これだけでも大きな経済効果があるが、固体核燃料の利用をやめ熔融塩核燃料にすれば、核物質輸送量をさらに数十分の一に減らせる。
こうした新しい核エネルギー産業が創設できれば、着実に国家間の核（兵器技術）拡散および核テロ集団による核技術悪用の防止が強化できよう。この問題は、第一〇章でまとめて論じよう。

第九章　「革命的な原発」の再出発

「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」の技術内容は、
トリウム採取に始まり発電・配電から社会・環境への影響にまで及ぶ。
ここではその特徴・長所短所を評価整理する。
また、その実用化に向けての開発課題を簡潔に紹介し、
原発をめぐる世界の近況を概説する。

システムの特徴一覧

本書では、現在使用中または開発中の原発は、固体核燃料使用（第五章）およびウラン利用（第六章）の点で不適当であり、また小型炉の世界展開（第七、八章）にも適さないことを明らかにし、今こそ実効的な増殖サイクルが実現できる「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」に移行すべきであることを、前章に示した。

そのシステムの全体像を次の二つの表で要約したい。

表9－1（左頁）では、できるだけ簡潔に二一世紀のエネルギー環境で最も重要な技術的問題点を列記し、それらに対する新核エネルギー構想の対処策を示した。大局的に全体像を捉えるのに役立てていただきたい。

今ひとつの表9－2（202～204頁）はそれを数倍させ、トリウム資源の採鉱に始まって最終的な経済性評価まで約一〇〇項目を取り上げ、それらに対するこの構想の独自性・優位性を要約して示した。さらに、安全性ないし放射線被曝に対する防止力についての私の評価を、次のマークで示した。◎は優れている、○は問題ない、△は注意を要する、である。評価は暫定的で未熟だが、充分実現性ある努力目標と考えていただきたい。なお、各項目の説明は、簡潔にしたため厳密さに欠けるが、前章までの本文で補正していただきたい。

表9-1　新しい核エネルギー技術によるエネルギー環境問題の解決

技術的問題点		達成目標	新核技術
資　源	ウラン：偏在・独占	普遍・豊富：トリウム	Th-233U サイクル（232Th＋中性子 → 233U）
地球環境適合性			
化石燃料	熱公害	低減(高熱効率)	
	酸性雨・スモッグ	大気汚染　なし	
	温室効果	CO_2、メタンなし	
核廃棄物	プルトニウムなど	(非生産)燃焼・消滅	
	ガス状元素	常時除去(炉内なし)	
	低レベル汚染物質	発生少量(炉内保持)	
核拡散・核テロ	軍用的	非軍用的	
	Pu問題(弱いγ線)	233U(強いγ線で監視)	
安全性			フッ化物熔融塩核燃料（核反応媒体・熱除去媒体・化学処理媒体）
基本的	化学的(ガス発生・火災)	火災・爆発なし	
	機械的(高圧・高流速)	常圧・低流速	
	核的(余剰炉反応度大)	微弱(燃料自給自足)	
工学的	固体燃料集合体	液体燃料	
	構造・運転・保守／輸送・化学処理　複雑	照射損傷なし／極めて単純	
	炉心熔融・再臨界	なし：重大事故なし	
燃料増殖サイクル	サイクル完成が困難	単純(熔融塩サイクル)	燃料増殖と発電の分離（加速器熔融塩増殖）
	燃料倍増時間が長過ぎ	短縮可能(5～10年)	
社会的適合性		(公共的施設)	
発電所	立地・送電の制約	需要地に接近可能	
	出力規模：大型	小・中・大型　自由	
	工業熱利用が困難	中温度有望(600～1000度)	
総合的経済性《運転保守作業》	《安全・核拡散テロ・廃棄物・輸送》	顕著な改善	

表9-2　トリウム熔融塩核エネルギー協働システムの特色

（◎　優れている、○　問題ない、△　注意を要する）

	主要な特色	安全被曝	補足事項
トリウム：			
資源	普遍・豊富	○	日本などの持たない国が少ない
採取	海岸重砂(黒砂)・鉱石残渣より	○	全世界需要は200万トン以内
	坑道発掘不要	○	地球環境を乱さない
精錬	高いガンマ放射能	△	遠隔操作を要す
	トリウム化学は単純	○	ウラン・プルトニウムは複雑
同位体濃縮	232が100%で不要	◎	ウランでは低濃縮が必要
ウラン233	加速器で核スポレーションまたはDT核融合で増殖	○	熔融塩ターゲット／ブランケット式未臨界装置、直接原発に供給
核燃料：			
燃料集合体	液体核燃料だから不要	◎	安定なフッ化物塩の調製のみ
リチウム7	熱中性子吸収を激減(天然92.5%)	○	リチウム6(7.5%)の除去は容易
ベリリウム	有毒(アレルギー中毒)で注意	△	放射性物質と共同管理
輸送・貯蔵	ごくわずかの量でよい	◎	炉運転の初期・終期のみが主体
化学処理	乾式バッチ方式で単純	○	脱被覆・溶解など不要
	臨界事故の恐れなし	◎	完全化学分離は不要、不純で可
増殖サイクル：			
	トリウム系熔融塩サイクル完成	○	強ガンマ線は、液体・遠隔で
	熱中性子炉で優れる(黒鉛減速)	○	わずかの輸送・化学処理でよい
放射性廃棄物：			
	プルトニウムなど生まれず	◎	分離せず塩サイクル内で処理
	それらと核分裂生成物を消滅可	◎	トリウム炉後退期に積極処理
	低レベル汚染物が少量	◎	燃料取り替えなく、保守作業わずか
発電炉FUJI：			
構造：			
炉容器	単純タンク(開閉不要)常圧	○	薄肉、内部は黒鉛(90%)と塩
高温格納室	500度維持。予熱保温測温不要	○	保守・修理・検査が容易
放射能遮断壁	炉容器・高温格納室・炉格納建屋	○	固体燃料炉と同じく三重遮断壁
	圧力上昇や爆発の要因はなし	○	燃料被覆管のような脆弱壁なし
正規運転：			
運転特性	連続運転が容易	◎	自己制御性・負荷追随性が良い
制御棒	殆ど不要(炉余剰反応度が僅少)	◎	燃料自給自足的、負の温度係数
再起動	容易(キセノンを常時除去)	○	塩中に溶解せず、ガス相へ移行
核物質供給	核燃料はほぼ自給自足	◎	少量の核分裂物質添加ありうる
	親物質のトリウムは適宜供給	○	FUJIで400g/日(半年に一度位)

⇦次ページへ続く

塩の化学制御	核燃料塩の酸化還元電位の調整 炉稼働前に塩で内部洗滌	○	変動はわずか。ベリリウムで還元
加速器増殖炉：	熔融塩ターゲット／ブランケット		トリウム組成を増やす
技術課題	照射損傷・熱除去など問題ない	△	大電流加速器開発がまだ問題
開発時期	約25年後に実用化すればよい	○	それ迄はプルトニウム処理対応
保守作業：			
核燃料取り替え	全く不要。トリウム添加のみ	◎	炉操業前と終了後のみ出し入れ
カバーガス	一次系：キセノンガスなど分離	◎	塩に溶解せず。ヘリウム吹き込み分離
	二次系：トリチウム分離	△	0.3キュリー/日以下の放出
機器保守修理	一次系は全面的に遠隔	○	構造単純。予熱材・保温材なく裸
点検検査	常時、遠隔	○	(同上で容易)
事故の防止：			
材料共存性	全面的に良い	○	炉心には黒鉛のみ。低流速
照射損傷	核燃料塩は全く受けず	◎	照射試験なども全く不要
	黒鉛は取り替え不要	○	寸法収縮のみ。熱応力なし
化学反応性	空気・水などと全く反応せず	◎	例外の黒鉛も窒息消火は容易
	ナトリウムのような酸化蒸着なし	○	ガス相の機器管理が容易
熱特性	塩の熱容量大。熱衝撃性なし	◎	配管は小口径。熱応力が少ない
	黒鉛の熱容量・熱伝導が大きい	○	熱設計が容易
内部圧力	常圧。核燃料塩の沸点は1400度	○	ガス発生反応なし
核分裂生成物	ガス物質は常時分離・除去	◎	外部放出防止。核燃料転換率大
	その他は塩中に留まる	○	複雑な連続化学処理施設不要
反応度事故	基本的に考えられない	○	核燃料塩多量：組成変動は困難
	炉余剰反応度が僅少	○	塩の大きな即発性の負温度係数
全流量喪失	核燃料塩が減り炉自動停止	○	黒鉛最高温度は1200度以下
重大事故：			
炉体破損破壊	炉心熔融起こりえない	◎	黒鉛の融点は4000度
	再臨界・核暴走ありえない	◎	核燃料塩は自動的にタンク収納
修理・炉解体：			
	遠隔(ロボット)作業が容易	○	構造単純。遠隔作業用に設計
	放射性物質が飛散しにくい	○	残留塩わずか。ガラス状に固着
稼働信頼性：			
設計条件	緩やか。燃料塩組成の変更容易	○	燃料塩の照射試験は不要
事故故障確率	充分に低い	○	構造・運転・保守が単純化
稼働率	充分に高い。連続運転可能	◎	核燃料塩などの取り替え不要
熔融塩挙動	問題が起きても理論予測が容易	◎	古典論的に物性評価理論が確立
事故試験	必要ならば試験実施可能	○	液体燃料炉で仮想事故想定困難

⇦次ページへ続く

発電所適合性：			
発電容量選択	中・小規模施設への対応に有利	◎	燃料体の取り替え機構など不要
	モジュラー化・複数基併設も	○	炉体標準化に適し、量産容易
発電効率	超々臨界水蒸気発電で～46%	○	熱公害が減少。軽水炉の60%
立地選定	電力需要地への接近容易	◎	安全性高く、隔離地面積わずか
電力輸送	近距離でよい。電力費が低廉化	○	発展途上国にも良い。世界展開
運転・保守	単純容易	○	作業量が少ない
社会的適合性：			
安全性	重大事故は考え難いほど安全	◎	放射性物質の環境放出確率が小
放射性廃棄物	低レベル廃棄物を含めて少ない	○	プルトニウムなどが生成しない
	積極的な消滅処理が可能	○	既存炉分処理も可能、適用容易
核拡散核テロ	プルトニウム完全廃絶の実現	◎	プルトニウムの有効利用・消滅
保障作業	核物質の監視・検出・検知容易	○	強烈ガンマ線で遠隔監視。
			非軍用的
核物質輸送	極めてわずか。社会負担を軽減	○	核燃料がほぼ自給自足
開発手順	小型炉から実用。技術成熟化	○	既存大型原発と競合せずにすむ
開発経費	基礎技術存在し、わずかでよい	◎	既に実験炉が4年の運転に成功
	ナトリウム機器開発実績の流用	○	化学活性・熱衝撃・酸化蒸着なし
	（常圧・高温融体技術）		
管理社会化：	大きく防止：核兵器の完全廃絶		
	規制緩和拡大：安全・非軍事的	○	情報公開・遠隔監視・公共施設
経済性：			
発電効率	充分に高い。～46%	○	連続安定運転で廃熱利用も容易
工業熱・暖房	～800度は比較的容易	○	二次系塩で熱輸送可能（～10km）
	～1000度も可能		熱伝達温度差が小さい
炉出力密度	適度で約10kW/リットル	○	設計・製作費を低減
燃料コスト	燃料体の製作・検査・輸送・解	◎	燃料塩の調整・脱水のみ
	体・化学処理・再加工など不要		
燃料燃焼率	初装荷量の5倍を連続燃焼	○	炉寿命の間、トリウム添加のみ
炉運転保守	単純な運転保守	○	適切な燃料塩の化学管理は必要
付帯作業施設	単純化、または不要に	○	濃縮・製造・検査・輸送などにつき
使用済燃料塩	炉寿命後に1回のみ化学処理	◎	地域センターで集中管理再利用
廃棄物管理	絶対量が激減	○	地域センターで集中管理再利用
塩サイクル	トリウム増殖サイクルの実現	○	放射性物質は循環、分離は最少
立地・送配電	小型・安全で需要地に近接	○	標準化炉型でモジュラー化
地球環境救済：			
大気汚染	硫黄・窒素酸化物の放出なし	○	燃料物質の取り扱いが激減
温室効果	CO_2・メタンの放出なし	◎	水素生産・技術利用促進可
放射能汚染	大きく改善できる	○	放射性元素は消滅処理が可能
廃棄物	残渣を含め絶対量が少ない	○	大部分は再生利用が可能
核エネ産業：	総発電量は約1兆kWe・年	◎	～1京（1万兆）円/年の産
			業創生

重要な開発上の課題

このトリウム熔融塩核エネルギー協働システムを完成させるのに必要な開発課題は、第七、八章ですでに説明してあるが、簡潔に要約し整理しておきたい。

●**ミニ（mini）FUJIの関係**——炉の設計仕様を詳細に固めつつ製作設計に入ってゆくが、そのために必要となるのは、（一）燃料塩・冷却材塩の取り扱い機器および技術の開発〔核分裂生成物の処理・管理を含む〕、（二）炉材料〔ハステロイ-Nおよび黒鉛〕の高温および中性子照射試験データの整備、（三）炉機器・計測器の開発、（四）高温格納室関連の技術開発〔遠隔操作技術とこの技術のみが未開発といってよい〕、さらにこの炉の最大の使命として、（五）炉システムの長期間の運転・保守作業に関する実績を確保すること、である。

これらを介して、中核となる人材・技術の基盤を整えつつ、続いて以下の諸開発が並行して展開されることになる。

●**FUJIの関係**——すべてが大型化されるので、充分な予備開発試験が大切だが、大局的には右と差異はない。成功すれば顕著な炉性能の向上・経済性改善効果が期待できる主要項目は、炉材料、特に黒鉛の耐中性子照射性能の改良だろう。

なお、炉技術の成熟化のためには、こまごまとした技術すべての改善がきわめて重要であるのはいうまでもない。

●**加速器熔融塩増殖炉の関係**——大電流加速器の開発、照射ターゲットとなる熔融塩の中で起き

る核反応の詳細な理論的解明と実測、標準塩組成の選定を進めつつ、システムの設計に入ってゆく。これにはベラルーシのソスニー科学センターの人々が協力してくれている。実用装置の設計完成までには十数年の余裕があるが、経済的な開発のためには早期の着手が望ましい。

なお、以上三つの炉システムは、すべて共通なフリーベ系熔融塩核燃料一種類から構成されていて、しかも、その基本技術はすでに存在している。したがって、驚くほど開発項目が少なく、開発経費・期間を最少にできる。また、将来において炉の規模や設計を多少変更する必要が生じても開発負担は軽い、という決定的な長所をもっている。設計に柔軟性があるからである。

●トリウム熔融塩核エネルギー協働システム――このシステム全体を世界に展開させるには、各地域センターの地域格差および時代を追っての技術変遷をよく加味した戦略を練り上げることが、最も肝要だろう。

これらに対応するため、有効かつ機能的な「国際開発組織」が必要になるが、技術の成熟が進むにつれて自然に育ってくるだろうから不安はない。このシステム技術の本性がそれを保証する、と確信している。

なぜ今まで開発されなかったのか?

さて、ひと通り熔融塩炉を理解してくださった人々からの最初の質問は、必ず「そのように良いものなら、なぜ今まで放置されてきたのか?　原発最強国の米国はなぜやめたのか?」である。

重要、有意義な質問である。その答えを少し詳しく説明したい。
実は戦後の「原発開発史」は間違っていたのである。
三、四〇年前までは例外があった。しかし大局は、「開発が第二次世界大戦中から始まった」ために、まず良いプルトニウム生産炉、次いで原潜用の良い発電装置の完成があまりに強く「志向」され、「優れた合理的〝核燃料サイクルの完成〟との関連・整備への配慮」は、「副次的で視野に入れないに近かった」と言っても過言でない。「軍用」では、安全性・経済性などは抜きで、「良いエンジン」が得られさえすればよく、その後は知らぬ、何とでもしてくれ、という姿勢になるのが自然だったのであろう。
この私の見方は、全く「奇をてらう」ものではない。以下述べるように、大戦中にすでに「明白に確認されていた原則」である。それが、時運に恵まれず、忘れ去られていたのである。
一九三〇年代に重要な四人の科学者がブダペストから米国に亡命してきた。その一人がユージン・ウィグナーで（他はエドワード・テラー、レオ・ジラード、ジョン・フォン・ノイマン）、人類最初の原子核エネルギー実用炉（原爆用プルトニウム生産炉）を完成させたが、その後、戦中シカゴ大学で催された「原子炉セミナー」で、ノーベル賞受賞学者たちの協力をえつつ、彼が中心になって結論づけたのが、次の原則である。
――核分裂は原子核物質が変化する「化学反応」である。したがって、当然なこととしてこの反応を利用するものは「化学工学装置」となる。もっと明確にいうと、この核分裂反応遂行、そ

の反応生成物処理・処分、使用可能な残渣の処理・再利用を経て、次の核分裂反応炉に循環させる「核燃料サイクル化学工学」を完成させる仕事が「事業の本質」である。直接有用な「発電」などは、そのごく一部の作業に過ぎない。――

しかもウィグナーは、「化学工学装置ならば反応媒体は〝液体〟が望ましく、その〝理想形態の原発〟はおそらく〝熔融フッ化物塩燃料炉〟であろう」とまで予言していたのである。「熔融塩炉まで一気に論じていた」と聞いて、多くの読者は「本当か」と驚かれるであろうが、彼は初代所長として世界最高の原発開発センター・オークリッジ国立研究所を整備し、次いで高弟のワインバーグを次代所長に推挙した。そのワインバーグが指導して、この「熔融塩炉」の基礎開発を成功させたのである（一九四五～七六年）。

このような重要な逸話も、三年前まで、筆者が伝えるまで米の中核のトリウム推奨者たちでさえ知らなかったことを理解しておいていただきたい。

以下、「放置されてきた理由」を列記する。

（一）熔融塩炉以外の液体核燃料炉はすべて失敗した

液体核燃料炉全般の開発史は、巻末参考文献に詳しく解説してあるが、熔融塩炉以外の液体核燃料原子炉は、みな容器の腐食問題などで技術的に失敗したといってよく、熔融塩炉は全くの例外的成功例であった。それで失敗した他の液体核燃料原子炉からの類推で、多くの人々は、熔融塩炉もその容器材料選択が困難なはず、と錯覚するようである。

現存の原発はすべて固体核燃料炉であるものだから、熔融塩炉も挫折した液体核燃料炉の同類と思われがちである。第二次世界大戦後、究極兵器の原子力潜水艦用の電源が早急に必要となり、水蒸気発電装置と連結させやすい「軽水原発」がまず実用化されてしまったことが、大きかったともいえる。軽水原発の発明者の代表・故ワインバーグ博士は、またオークリッジ研の熔融塩炉開発の最高指導者でもあったが、最後まで「生きているうちにミニ（mini）FUJIが動くのを見届けたいもの」と、我々を励ましてくださったのだが。

（二）トリウムには核分裂性の同位元素が不在

天然ウランが核分裂性のウラン235の存在（〇・七二パーセント）により直接に原子炉で利用できるのに対して、トリウムは親物質の働きをするのみで、必要な核分裂性物質を最初は外部から供給しなければならない。さらに、初期のウラン動力炉が武器用のプルトニウム製造工場を兼ねることができたのに対し、トリウムから作られる核分裂性ウラン233にはウラン232が随伴し、これはガンマ線が強くて軍用に適さない。これが敬遠の要因となった。

このウラン232は平和利用にも阻害要因となった。トリウム利用産業を実現しようとすれば、少なくとも使用済み核燃料中にトリウムから生まれたウラン233を回収利用し、燃料に再処理して、随伴するウラン232が発する強力ガンマ線のために経済的実施が不可能だから、トリウムの本格利用は「虚構」となる。固体核燃料ではだめで、熔融塩炉利用が必須ということが事態を困難にし

た。
（三）熔融塩炉は製造メーカーに魅力がなかった。核燃料体の製造販売が不要となってしまう
今までの原発産業は、一、二年で取り替える芸術品的「固体核燃料集合体」製造でもっぱら利益を得てきたので、「液体核燃料はご免だ」と公然と反対した。一九七三年頃の米議会両院合同原子力委員会の公聴会で、原発業界代表は「熔融塩増殖炉には興味がない。この炉では固体燃料製造の利益が期待できない」と証言している。
確かに原発業者は、今でも燃料体製造のみで潤っているが、あまりに呆れた狭い了見の本音発言である。このような企業理念であったから、核産業は以後衰弱したのである。
（四）一九七〇年代の政治情勢
一九七六年には、技術的理由でなく、核拡散を防止する政治決断によって「増殖炉開発禁止」が実施され、高速増殖炉のみならず、熔融塩増殖炉プログラムまでもが終了させられた。
これは、実はなかなか理解困難な措置である。これを決定的にしたカーター大統領自身は、若いときは原潜開発担当の核工学専門家であり、国家の存亡に関わると高速増殖炉開発推進を主張する非資源国日本の外交交渉団（米国はわが国に高速増殖炉開発中止を要求した）に、「では、日本では高速増殖炉でなく、熔融塩増殖炉を開発したらどうですか？」と薦めている。立ち会った外交官の二人が別個に私に聞かせてくれた「事実」である。それは日本の担当者たちの理解を全く越えた新科学理論であり、押し返して高速増殖炉開発続行に落ちついたという。

カーターが米国での熔融塩増殖炉開発推進をやめたのは、まだその技術開発段階が未熟であるのを知っており（第八章参照）、その開発を認めれば、それに数十倍する勢力と実績を持つ高速増殖炉支持者たちからの開発推進要求を抑えるのは不可能、と考えたからである。現に、その後十年以上も、高速増殖炉推進派は議会で予算停止に抵抗を続けたのである。なお当時、米国は日本と違いエネルギー資源はまだ有り余っていて、熔融塩増殖炉などの開発を急ぐ必要はなかった。

（五）プルトニウム擁護派という隠然たる勢力

ＮＰＴ（核拡散防止条約）関連でも常に国際的混乱を引き起こしていることからも、それは想像できよう。だから、隙をねらってトリウム推奨は抹殺される。プルトニウムはウラン233に比べ決定的に核兵器向きであるにもかかわらず、「ウラン－プルトニウムサイクルとトリウム－ウランサイクルは、核拡散防止を阻むことにおいて大差なし」というとんでもない結論を、ＥＣ・日本などが先導してＩＮＦＣＥ（国際核燃料サイクル会議、一九七八年）で下したのは、その最たる事例である。「高速増殖炉擁護のためだった」と、関係者自身が言明しているが、今でも無思慮な専門家たちがその結論を信じている（ただし、そうした結論が下されたのには、当時進められていた熔融塩増殖炉に連続化学処理装置が用意されていて、これが核拡散防止上では不利だったことも影響している。核拡散防止には、「増殖」機能を分離する、我々の新方式が必要である）。

（六）トリウムは非軍事的な技術である

一九七〇年以前の初期平和利用時代には、米国でもトリウムはかなりの関心をもたれていたが、

核冷戦の激化とともにプルトニウムに関心が向けられ、非軍事的なトリウム研究は、米国を初め諸外国では、ほとんど一九八〇年以前に死滅させられた。我々の努力は本当に例外だったのである。

最近の炉工学の教科書には、「熔融塩炉」はもちろん「トリウム」さえも現れないのが普通である。その結果、原発といえば、もっぱら「ウラン‐プルトニウム固体燃料炉」に限られてしまった（原理の全く違う液体燃料炉型を教科書で取り上げるとしたら、全く新しい章を立てねばならず、著者も出版社もそれを嫌ったのであろう）。

それゆえ現代の原子炉技術専門家は、ウラン、しかも固体燃料炉を知るのみである。三〇年以上前に書かれた教科書には、トリウムに関する記述も多量に示されていたのに、である。

（七）熔融塩炉はあまりにも成功した。失敗がなくニュース性がなかった

内容があまりに新規で大衆的でなく、また話題にのぼる機会が限られていた。それは、ルーズベルトのニューディール政策でテネシー渓谷総合開発計画が実施されたくらいの最僻地で進められたからである。僻地だからこそオークリッジ研究所敷地には渓谷開発で生じる電力に依存した超秘密ウラン濃縮工場があり、それがため接近はさらに困難であった。また、この研究所一カ所のみで研究開発が進められ、信じられないくらいのわずかな資金と人員（直接の要員は最大で二三〇名）ですべて進められ、成功したのである。事故が皆無であったから、ニュースにもならなかった。これは「いかに優れた技術内容のものであったか」の証（あかし）であるが、不運にも逆にこれが

最大の「欠点」となって、ほとんど知られもせず、誤解を誘発した。私も一九六八年に訪問してみて、初めて成果に驚嘆したくらいである。

したがって、考えられないような不当な評価が世に流れた。我々も含めそれに抗議しようとした人が何人もいたが、肝心のオークリッジ研究所の人々が何も言わないので、「良いものであれば、彼らがなぜやめたのか？」という捨て台詞（ぜりふ）を浴びるのが常であった。実は、職を賭して発言しようとした所員も何人かいたが、所長らに抑えられた。政府に睨まれるとさらに予算が切られ、研究員を退職させなければならなくなるからだった。それがしばしば実行されたのである。研究者の中には「このような優れた構想を受け入れない社会に生きていたくない」と悲憤絶望し、自殺した者もいた。

（八）不当な解説が横行した

したがって、代表的な学術書にも熔融塩炉に関する不当な解説が実に多く存在し、それがどれだけ陰に陽に我々を妨害しているか計り知れない。例は枚挙に暇（いとま）がないが、ここでは三つだけ取り上げよう。

（A）一九七八年、最も権威ある米物理学専門誌に、核燃料サイクルの総合報告が出たが、その中の熔融塩増殖炉の解説は、熔融塩が$LiBeF_2$と誤記されているのみならず、「主として熔融塩の腐食問題により開発停止させられた」と論拠なく書かれており、唖然とさせられた。

（B）インドは熔融塩炉の特別なシンパだといってよいはずなのだが、そのバーバ原子力研究所

の炉材料部長ロドリゲツ（その後インディラ・ガンジー高速炉研所長）が一九八一年に書いた最も権威ある核燃・材料専門誌の「炉材料の総合解説」には、熔融塩炉材料の研究成果を一九七〇年までしか取り上げていない。一九七〇～七六年の極めて重要な進展に全く触れず、「まだ多くの材料問題が残る」と実現可能性を否定している。それを一九九一年に彼より贈られて知り、二度厳重に抗議したが、何の釈明もない。今はその理由がよくわかる。一九七〇年前後にインドは、密かに重大な核軍備戦略を採択し、プルトニウム路線に強く傾いていったから、それに反するものを排除したのである。

（C）一九九七年夏、EUによるトリウムサイクル研究の総合調査報告が私のもとに贈られてきたが、これは（B）よりさらに悪く、驚いたことにオークリッジ研究所の業績は一九六八年までの記述で終わっている。これ以降に決定的な進歩があったのだから、考えられないことである。一九八〇年に始まった我々の新構想は紹介され、私に謝意まで表しているのであるが、私の厳重な抗議には逃げるのみである。その頃のEUはフランスを中心に、トリウム路線無視に大きく傾いていた。支持派はソ連のみといってよかった。

このような不当な資料が流布しているためか、最近でも熔融塩炉を評価させられた「非専門家」は全員、「熔融塩炉は腐食が問題である」と、ただ一言のみで断罪排除するのが常である。「文献を調べたのか」と聞いても、答えられる人はいない。聞かされた話の孫引きのまた孫引きである。マスコミさえ技術解説しない事態は、いまだに改善していない。

この腐食の問題は、延々と終わることのない複雑怪奇な軽水原発の腐食現象などとの比較でいえば、雲泥の差をもって明快に解決した話題である。詳しくは本書内の解説をよく読んでいただきたい。

もちろん、広い意味で「材料問題のない技術」などはないから、運転実績を積むことは重要であるが、知識さえなく、不当・安易に「腐食に問題あり」と言うのは許せない。まして専門家たちがオークリッジ研究所の研究実績を秘匿（ひとく）するなど論外である。

我々はミニFUJIを建設し運転することで実績を示したいと考えている。もし問題が発見されても、試行錯誤ではなく理論的に原因が解明され、対応策が簡明に開発できるであろう。それがこの技術の優れたところである。

世界の原発事情

ここで、世界の近況をひと通り確認しておきたい。二〇一〇年現在、四四三基の原発が三一カ国（台湾を国として入れて）で運転されている。建設中の原発も三〇〜四〇基はある。また、全発電量中に核エネルギーが占める比率は、現時点で、フランスの八〇パーセントを筆頭に、中国の二パーセントまで分布している。

将来に向かっての核エネルギーへの期待度は、国情によりきわめてまちまちである。

福島で原発事故が起こる前までの各国の情勢は、以下のようであった。

最も意欲的な国の中に中国・インドなどが入り、アジア・南米・アフリカ・中近東など比較的発展途上の諸国を中心に、決して少なくない国々が、国民生活の質向上に必要と認めて、並々ならぬ意欲を示していた。

一方で、この方面で経験豊かな国々においての意欲減退が際立っていた。これにはわが国も入っているのかもしれない。各国ともに世論は分断され、論者の視点も短・中・長期さえ定かでない。多くの人が、ずばり原発廃絶とは割り切れず、かといって現状の技術も信じられず困惑していた。

法的な原発廃絶に先鞭をつけたスイス・スウェーデンそしてドイツなどは、明確なエネルギー政策を示せず、混迷を深めつつある。廃絶を謳いながら、現実はずるずると現状維持を続けるのみである。

今、経済全般が活況を呈しているフランスでも、未来は定かではない。もう十数年来ほとんど新しい原発建設はなく、核産業の維持が問題である。それで一九八七年フランス政府は、トリウム熔融塩炉構想を検討すべく私を招待し、今また再考を始めている。

ロシアはここのところ、世界の表舞台から降りたかに見えるが、そんなロシアを中心とした東欧・中央アジア諸国は、今は一応は天然ガスに支えられている。しかし、その風土（極寒の僻地など）での核エネルギーの優位性をよく知っているだけあって、旧ソ連は一九八二年頃から熱烈に私に接触してきた。実情をなかなか計りかねたが、予想以上に具体策をもった協力要請であっ

たことが、数年遅れで次々に判明した。一九九五年には核戦略研究所ITPが、ミニFUJI建設計画に場所も提供して協力したい、と提案してきた。なお、ロシア原子力省は原発稼働による現金収入が確保できるので、ソ連崩壊後も比較的安定した省庁であり、市民とともに核科学技術者・労働者の約一〇万人と、他で代えがたい優れた開発施設を温存してきた。

米国は一三一基の原発を建設し、現在一〇三基が稼働する最大の原発国（全電力の二〇パーセントを供給）だが、十数年のひどい停滞の後、近年、電力事業の自由化政策もあって、原発事業の買収・統合が急速に進み始めた。いわば「原発の株が上がり」、フルに活用しようと原発稼働率が軒並み八〇パーセントとなり、目いっぱい長く使おうと原発寿命も四〇年から六〇年に伸ばされ、短時日に原発売買価格が一〇〇倍になったという。スリーマイル島事故（一九七九年）から三二年を経て、やっと最小限正当な評価がなされるようになってきた矢先に、今回の福島の事故である。現オバマ政権は推進しようにも、過去の「負の遺産の巨大さ」「核科学人材・能力の喪失」に戸惑っている。それに加えて今回の福島の衝撃である。米でも事態は重大である。

第一〇章　核兵器完全廃絶への道

「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」は、
二一世紀のエネルギー・環境問題を解決するのみではなく、
核兵器の完全廃絶への道にもつながり、
人類の平和で豊かな未来を約束するだろう。

核拡散防止への取り組み

ここまで本書の記述は、「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」の基本理念・技術内容の説明に費やしてきたが、まだ画竜点睛を欠くように思う。実は「エネルギー環境問題」は真の主題ではない。問われているのは「人間の文明」である。提示する技術が人間らしい文明を発展させるのに役立たなければ無意味である。新しい核エネルギー技術を提起するからには、特に、我々の生存にとり最も重要な政治課題のひとつである核拡散問題のいっそうの改善に取り組むべきである。

核燃料の管理は決して簡単ではない。しかも、ウランからトリウムへの過渡期にはどうしてもプルトニウムを処分しなければならないし、トリウム時代の主な火種であるウラン233も核分裂性物質である。したがって、核分裂性物質と核爆発（すなわち核兵器）との関係をもう少し立ち入って考察しなくては、核拡散・核テロ対策も包摂した平和核エネルギー産業を構想・設計することはできない。

核拡散には三つの方向がある。㈠水平方向への拡散として、核兵器保有国数の増大、㈡垂直方向として、核弾頭の数・質の向上、㈢テロリストへの拡散、である。

核冷戦の終結で㈡の弾頭数は明らかに改善されたが、肝心の㈠は決して平穏ではない。その保有を、すでに保有している五大国の米国・ロシア・英国・フランス・中国に限るために核拡散防止条約（NPT）を整備し、国際原子力機関IAEAが国際査察に多大の努力を払ってい

るが、一九九八年のインド・パキスタンの核実験競争に見られるように、核冷戦時代よりも足かせが確実に弱まっている。そもそも五大国だけの独占には正義がない。

米国の政治評論家ジョナサン・シェルは、一〇年前に国際外交誌『フォーリン・アフェアーズ』で「核不拡散と核兵器による抑止戦略とは、決して両立しない」ことを論証している。今や完全な核兵器廃絶のみが核戦争回避の有効な解決策であり、それを怠れば、世界が支払うことになる代償は、ナチスの横暴を看過して起こした第二次大戦、さらにはベトナムの悲劇以上のものとなろう、と警告している。現に、未臨界実験などで（二）の質向上・軽量化が進んでいるし、（三）の恐れは増大し、その面でも事態は悪化している。

さらにその後、「北朝鮮の核軍備活動」は悪化の一途をたどっている上に、最高指導者の「平和利用宣言」にもかかわらず、「イランでの疑惑」が世界の大きな課題になっている。

核拡散防止の決定打

改めて核拡散防止策をよく理解し、世論を高めるべきである。ただし、直接的、物理的な防護手段のみでは不充分で、積極的な抑止措置が必要である。まず、

（一）核物質の間接的な保有確認・持ち出し監視・所在検出などが常時できるよう、それらの能力を高めることである。これには、ウラン233に随伴するウラン232が二・六ＭｅＶというきわめて高い透過力のガンマ放射線を出すことが、有効に利用できるだろう。

一九八九年、核冷戦下の黒海で行なわれた米ソ合同核弾頭検知実験では、艦船上空のヘリコプターでこのガンマ線が明白に検出できた。その核弾頭がウラン233で作られたものではないのに、である。みんな不思議がっていたが、ウランにはごく微量のウラン232が必ず混在するのである。一般原発の使用済みウラン燃料中にも、これが微量に生成する。その量はトリウムを燃やす中で生成される量と比べれば約一〇〇〇分の一だが、燃焼を繰り返すごとに増えて、次第に化学処理や燃料体製造を困難にしている。黒海で、この超微量のウラン232が検出できたのは、これがきわめて有効な検知手段であることを証明するものである。

(二)核物質の核化学的状態を複雑にし、容易な分離や核弾頭の製作を困難にするのも有効である。その方法のひとつとして、同位体を添加する(これを「変性」と称する)「同位体希釈法」がある。たとえば、ウラン233が一二パーセント以下、ウラン235では二〇パーセント以下の濃度となるようにウラン238を添加すれば、爆発力が大きく(少なくとも二〇分の一以下に)低減できる。

プルトニウムの場合はあまりよい添加体がない。ただし、プルトニウム240は常に自ら核分裂を起こし、核弾頭の設計を困難にする。またプルトニウム238は高い崩壊熱で管理を困難にするが、これらを添加してもTNT火薬で一〇〇〇トン級の爆発は可能である。

一般に、プルトニウムは239・241などの核分裂性核種が核物質中に占める濃度によって、

超級(SG):九七〜九八パーセント　　兵器級(WG):九三パーセント以上
原発級(RG):七〇パーセント以上　　変性級(DG):二〇パーセント以下

に分類されている。ただし、原発炉から得られたどのような種類のプルトニウムでも、濃縮せずに爆発させられることは、知っておいていただきたい。

なお、プルトニウム241は半減期一四・三年であり、年率四パーセントでアメリシウム241に変化し劣化してゆく。それから放出される崩壊熱量が大きいのも問題である。それでプルトニウム弾頭は、数年ごとの取り替え更新が行なわれている。

詳細は機密が多くてわからないが、米国のローレンス・リバモア戦略研究所の安全保障専門家が結論として教えてくれたのは、

「ウラン235が最も兵器に適する。プルトニウム239がそれに次ぐ。ウラン233は兵器には最も困難かつ好ましくなく、これまでウラン233で原爆が作られたことはない」

というものだった。残念ながら、これ以上は確かめようがない。

ウラン系は一度充分にウラン238を加えて変性すれば、濃縮して元に戻すのは容易でなく、必要な核弾頭の総重量も巨大になる。さらに、ウラン233を使おうとすれば、随伴するウラン232のガンマ線が強くて、兵器製作が困難であるのみならず、兵士の安全も守れない。したがって、トリウム利用はより非軍事的な技術であると結論できる。ましてテロリストの手には負えないだろう。

何はともあれ、核兵器廃絶を実現しなければ、核エネルギーの健全な平和利用は始まらない。これを支持する世論は着実に高まっている。核冷戦もなくなった今、根拠のある反論があるはずがない。日本が先頭に立とう。

この核兵器廃絶を具体的に促進するのが、本書で提案するトリウム熔融塩核燃料サイクルへの移行策である。

プルトニウム消滅に有効な技術

核拡散防止上、最も危険な物質はプルトニウムおよびその他の超ウラン元素（アメリシウム、キュリウムなど）だが、このトリウム熔融塩核燃料サイクルシステムの採用によって、それらの生産が止まるだけでなく、それらの焼却消滅処理もでき、核拡散問題の解決に大きく貢献できる（第六章参照）。

ただし、トリウム利用炉であってもそれが固体燃料炉であれば、一回の燃焼ですべてのプルトニウムが消えるわけではないので、核燃料の再処理・再加工が必要となり、それだけテロリストらによる盗難の機会が増える。また、固体燃料炉は本来、余分に核燃料を装荷する設計となっているし、液体よりも固体のほうが盗み出しやすい。熔融塩炉は、核物質の管理の面で、これらすべての点で有利である。

また、核兵器を一個作るには、熔融塩炉のウラン233主体の核物質は少なくとも約一〇キログラム必要だろう。熔融塩核燃料中には約一重量パーセントのウランが含まれるので、テロリストは約一トン（三〇〇リットル）の塩を盗み出す必要があるが、強度のガンマ放射線ですぐ検知され、また、炉には余分な核物質は装荷されていないので発電が停まり、盗難はただちに認知される。

発電炉FUJIは燃料自給自足型なので、追加の核燃料はほとんど不要であるが、追加する場合には、盗難防止に一回量をウラン八キログラム以下に制限するとよい。また必要ならば、一〇倍量の天然ウランで変性し兵器利用を防ぐがよい。炉内にある数十トンのトリウムに比べれば少量なので、この程度のウラン238を炉内に持ち込んでも、生まれるプルトニウムの量は問題にならない。また、発電炉では全く燃料塩の化学処理を行なわないので、核物質のみの盗み出しはできない。

現在、全世界で国際原子力機関IAEAを中心に行なわれている核保障措置および核物質防護の経費・人員は多大である。また、すでに現方式では完全な核拡散防止は不可能と考えられていて、このままの原発利用の拡大は、大きな国際社会問題になってくる。トリウム熔融塩炉系のシステムでは、無人遠隔の常時監視法がはるかに容易に適用でき、問題打開に大いに貢献できる。

核兵器の完全廃絶実現への道

フランスが核軍備を決意したのは、隣接した最大の敵国（?）ドイツが通常兵器で装備するよりも、はるかに安上がりに軍事力整備ができると考えたからであり（本書でしばしば強調してきたように、核分裂技術の本性は実に単純なものであるのが要因である）、それ以外の何ものでもない。

この事実はきわめて重要である。その後、真似をする国が続出し、今後もその流れを止めうると考える専門家はいない。核軍備が抑止力などというのは、核を保有する強国の全くの幻想であ

る。敵対的な非保有国には、核は明らかに割安で絶好な対抗手段と映っている。

したがって、プルトニウム利用の推進にわが国が一番熱心なために、唯一の原爆被災国として国民すべてが原爆に反対しているのだ、といくら主張しても、海外でだれひとり信じてくれる者はいないのだそうである。これが、日本は核冷戦終結を全く無視し何ひとつ活かしていない唯一の国ではないか、と言われるゆえんでもある。日本人は改めて他国人と話し合うことをもっと始めないと、大変なことになるだろう。

核兵器廃絶の動きは、全面的な使用禁止・廃棄が国際条約になっている生物および化学兵器に比べ、遅れをとっているが、それでも国際司法裁判所は「核兵器使用・威嚇は一般的に違法」という判断を、一九九六年に示した。

今は核大国に妨害されているが、もっと国連で明確に論議されるべき時期にきている。それを促進するためにも、核エネルギーの平和利用が核兵器完全廃絶に支障をきたすことのない合理的な核産業技術論を整備すべきである。これは世界に冠たる平和憲法をもつ日本人の責務と思う。ここで再確認しておきたいが、日本は日本だけでは生きてゆけない。世界の関連問題を解決できる方策を準備しなければ無意味である。

そのために今、何を考えたらよいのだろうか。今まで口にするのを控えてきたが、次の提言をすべきときだと思う。

「プルトニウム・天然ウランの全面使用禁止を目指そう!」

みなさんはこれをどう思われるだろうか。驚かれるだろうか。決して簡単ではなく、今後最低五〇年はかかる事業だが、必ずたどらなければならない道ではなかろうか。
二〇〇一年春、米国国防省諮問委員会が、これから最も警戒すべきは、「核を含む大量破壊兵器による『国内におけるテロ集団による壊滅的な攻撃』である」という報告をした。
ノーベルが一世紀前に問題提起したように、科学技術には、戦争を助長するような手段を提供し続けた、という面もあったのではないか。科学技術が先導し、政治手段が後に続くような積極的な方策を、今こそ提供すべきときと思う。

プルトニウムの使用禁止に向けて

プルトニウム問題の具体的な打開策として、一般に言われているのは、次のような手順である。
（一）核兵器用の核物質を排除消滅させる
この論議はソ連崩壊後に始まった。しかし難問続出である。まず、核弾頭を全部廃棄するという国はない。その焼却消滅法も定かでない。一部の人は既存の原発を利用して焼却しようというが、ウラン燃料炉で燃やすのであれば、プルトニウムはなくならない。
（二）現存の民需用プルトニウムの利用も停止し、消滅させる
次第に法的にその停止・消滅を決める国も出ているが、それを世界に拡張するのは容易でない。日本の実情を見れば明白である。「高速増殖炉開発を止め、再処理を止めろというのか」と猛反

発する人が出てくるからである。しかし少なくとも、増えつつあるアジアの原発からの使用済み燃料でさえ、すでに行き場がない。未処理で貯蔵された使用済み核燃料は、放射能の減衰があるので五〇〇年以内にプルトニウム鉱山になってしまい、容易にプルトニウムが取り出せる。

(三) 使用済み核燃料を再処理し、プルトニウムは既存炉で消滅しようとする

これも、さらに矛盾を増大させ、核拡散防止作業を膨大にするだけである。米国・ドイツ・スウェーデンその他の国は法的に再処理を禁止している。既存の再処理技術では高くついて、どこも実行しないだろう。

少なくとも (二) と (三) の矛盾は自明である。化学再処理して処分する他はないのに行なえない。だれが見ても、現在規模の核エネルギー産業では環境対策にも決定的に役立つわけでなく、すでにこの産業の未来はないのに、ただ現状の矛盾を糊塗し、今を生きているのみである。核拡散防止条約 (NPT) という五大核大国のエゴの下に立ちすくみ、インド・パキスタンなどに対し「正義」さえもかざせないまま、万事を先送りしている。専門家の間では、NPT保全のための核保障措置および核物質防護は、技術的・経済的に行きづまりつつあるとの意見が強い。

私が提示したいプルトニウム問題の具体的解決策は、次のようなものである。

(A) 熔融塩炉FUJI-Puを完成させる。それを用いて軍用ないし民需用のプルトニウム (高純度のウラン235も) を燃やして発電しつつ、ウラン233を生産する。

(B) 並行して使用済み核燃料を、乾式フッ素化法のFREGAT方式工場を準備してすべて化

学処理し、プルトニウムを含む熔融塩核燃料を準備する。

（C）それをFUJI‐Puないし加速器熔融塩増殖炉などで完全に燃焼処理しつつ、ウラン233を増やして次第にトリウム熔融塩核燃料サイクルに移行し、FUJI‐U233による発電を行なう。

これにより、自然に「プルトニウムの全面使用禁止」の状態を実現させる。

ウラン時代からトリウム時代へ

以上の案は、前章までに提示した技術方策そのものでもある。事実上、何ひとつ政治的努力をしなくても、少なくともいかなる強制力を働かさなくても、自然に民需面での「安くて社会的に良いものを作ろう」という経済性原則が解決してくれるだろう。

その具体的数量的な予備検討として、数年前に次のようなシナリオを作ってみた。

OECD全体としては、原発の規模の拡大をほとんど見込み薄としているかに見えるが、それでも一番強気の予測では、現在のような原発が二〇三〇年頃に三倍になり、後は自然引退し消滅してゆくという。裏づけとしては、近年のアジアその他における原発利用気運がある。また、二、三年来ようやく核エネルギー利用に目覚めてきた米国の動向もある。これに右の戦略を利用し、生まれるプルトニウムを始末してゆけば、図10‐1（次頁）に示したような経過で、トリウム時代へと移行できるだろう。

図10‐1の①の点線は、今世紀の全世界でのウラン‐プルトニウムサイクルによる発電量予測

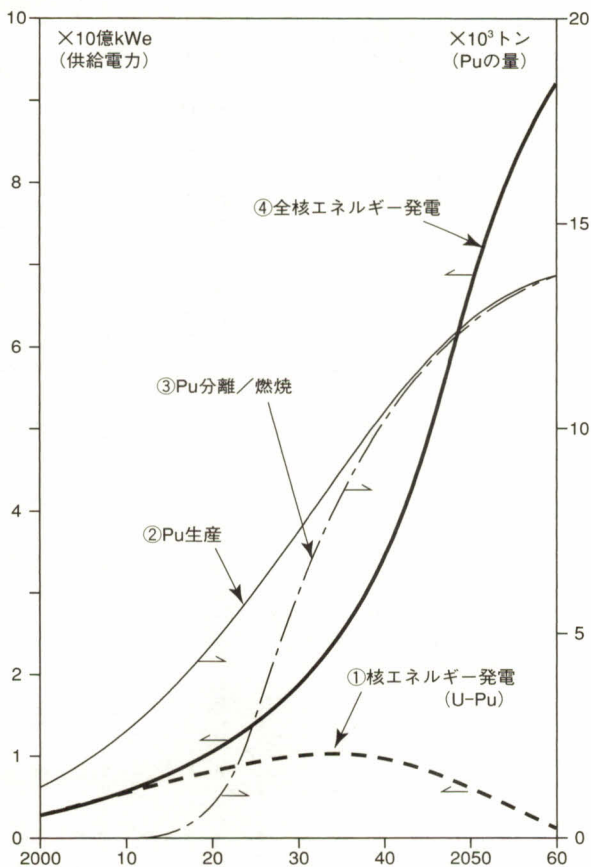



図10-1　ウラン時代からトリウム時代への現実的な移行方策
←→の矢印は、①④は左軸、②③は右軸を使って図を読むことを示す

値である。一応事例として、二〇三〇年が最大で、現在の約三倍になると置いた。②の曲線は、それに伴なうプルトニウムの生産総量で、総計は約一万四〇〇〇トンと推定した。③の破線は、プルトニウムその他の超ウラン元素を経済的にフッ化物塩として分離し、それを燃料にＦＵＪＩ－Pu（二〇一〇年以降）や加速器熔融塩増殖炉（二〇二五年以降）を稼働して完全に燃焼処理しつつ、ウラン233を得る経過を示す。

これらの計画を遂行することによって、次第にトリウム熔融塩核エネルギー協働システムを世界に展開しつつ、④の曲線で示したような発電を実現する。この④の曲線はまた、目標としていた45頁図１－２（Ｄ）の曲線を現実化するものとなっている。

このような世界情勢が実現できれば、プルトニウムはもちろん、天然ウランも欲しがる者はいないだろう。ただしテロリストは別である。天然ウランと重水または純度の良い黒鉛があれば、原始的な炉で比較的容易にプルトニウムが作れる。太古であったが、ウラン鉱床内で天然のウラン炉が稼働したこと（第二章参照）を思い起こしていただきたい。

したがって、このトリウム利用の新時代には、天然ウランの厳重な国際管理を実現させなければならない。今はまだだれひとりそれを主張する人がおらず、また容易なことでもないが、これは「麻薬」や「銃砲」規制と同類であり、困難だからといって放置できる問題ではない。ウラン資源は比較的に偏在し、すでにかなり詳細に調査管理されているから、国際的対処は充分可能と考えたい。

もっと早く「プルトニウム・天然ウランの全面使用禁止」時代を実現させることも可能だろう。社会経済的に見合えば、積極的にウラン原発をトリウム原発に置き換え、二〇四〇年頃を目標とすることも不可能ではない。そのときまでに処理できない使用済み核燃料およびプルトニウムは、特殊な地域センターに集めて厳重に国際管理しつつ、加速器熔融塩増殖炉などで処理すればよいからである。

今こそ科学精神を

我々の求めているものは何か。今、締めくくらなければならない。

第二次世界大戦後、北欧の社会民主主義運動の先導者でもあった科学哲学者カール・ポパーは、哲学は「宇宙論」であるべきだと言ったが、今は「人間学」として考えてみたい。まず求めているのは「平和」である。若いときインドの哲学者（駐日大使）が「宗教とは命を大切にすることだ」と教えてくれた。「殺さない」ことである。まず戦争をなくすことである。長崎以後の六五年間、一発も実用にできない核兵器が、いまだに存在するなど論外である。

ささやかながら、その完全廃絶への挑戦を本書で試みたのを、蟷螂（とうろう）の斧であったとしても誇りとしたい。

殺し合いをなくすには、いやでも人間同士の厳しい論争を何倍にも強めるべきだと常々考えているが、それはさておいても、我々が「命」の次に求めているのは「自由」だろう。我々は本心

「気ままに生きたい」のである。自由は底知れず深遠な命題である。孔子の「心の欲する所に従って矩(のり)を踰(こ)えず」という境地や、老子の「無為自然」には、その深遠な自由がある。しかし、現世の我々は、深遠な自由をつかみ人里離れて暮らす仙人にはとてもなれないし、そんな仙人になれなくても、文明を謳歌満喫しつつ自由に振る舞いたいのである。その人たちの「平和」と「自由」を保障するのは「エネルギー」である。食物も、あらゆる意味での環境も、そして労働が関わる時間もみな「エネルギー」に依存する。「贅沢な仙人（?）」の存在も許すような「地球」を、我々は望んでいるのではなかろうか。

「エネルギーの供給を充分に！」と言うと、「そんなことをすると、無駄づかいをして地球を壊す」とよく真剣に批判された。一理はあるが、ものは充分あれば必ず無駄づかいするものだろうか。ある面ではそうかもしれないが、たとえば、充分ある空気を無駄づかいするだろうか。空気を吸い過ぎると、過酸化状態になり危険である。電力が充分に得られる状況になったら、きっと何かが起こるだろうが、解決できる、解決に向けて努力するのが楽しみになるはず、と考えたい。少なくとも「エネルギー不足で人が餓え、殺し合い、地球が砂漠化してゆくよりはよい」と信じたい。

私もこの問題解決への挑戦に、戦争体験を背景に半世紀をかけることができたのを幸いと思っているが、まだ提案したに過ぎない。世界の若い科学技術者たちに、その開発を実行してもらわなければならない。

文明は、文化は、飽くなき創造で支えられるものである。支えるのは人間の努力であり、智慧である。智慧とはまさに科学精神である。「科学」とは何か、と否定的に問う人の多い時代だが、私は科学とは、「人間が平和に自由に生きたいと願い、みんなで『共同して努力する』思想態度」と解している。定義が先にあるのではない。思想があってそれから言葉があるのだから、「科学」がきらいなら「智慧」でよいと本気で思っている。お釈迦さま、そして仏教は、学問的であり科学的だった。「文殊の智慧」とは、ここでいう「科学」以外の何ものでもないと思うのである。

「科学精神」を改めて鼓舞するのが、最も大切ではなかろうか。我々の「地球」をより住みよいものにするために。それなしには、我々のエネルギーシステムも絵に画いた餅である。

リリエンソールの夢

私のトリウム研究に魂を入れてくれたひとりに、米国の故デビッド・E・リリエンソールがいる。縁あって彼の最後の書を発刊直後に和訳し出版できた。『岐路にたつ原子力』(訳者＝古川和男、日本生産性本部刊、一九八一年)がそれである。

刊行は、故西堀榮三郎先生と日本生産性本部会長だった故郷司浩平氏の決断のおかげである。この本で私は、著者リリエンソールの、真摯強靱な社会正義感から発した「核エネルギーを真に人類のものにしたい」という情熱、政治と社会と科学技術の葛藤に誠実に立ち向かった姿を、具

体的に学び、かけがえのない教訓を得た。
リリエンソールは公共事業関係の弁護士出身で、最大の業績はテネシー渓谷開発公社（TVA）総裁としての地域総合開発の達成である。この巨大な水力発電がウラン濃縮による原爆製造を成功させたのは皮肉だが、ともあれ戦後は一九五〇年まで、米国の初代原子力委員長として、原爆の国際管理・核エネルギーの平和利用政策の基盤を作った。水爆製造に反対して職を辞した後は、自由人として開発途上国の総合地域開発のコンサルタント、さらには核エネルギーの平和利用の健全化という至難な社会問題に精魂を傾けつつ、この書をまとめた一年後の一九八一年一月に病死した。和訳出版が決まり、手紙を差し上げようとしつつある最中だった。「原子力への賛成・反対」を問わず、好評に読まれたと知り、改めて彼の生涯をかけた尊い戦いに敬意と感銘を覚えた。最近、「天声人語」（朝日新聞、二〇〇七年二月二日）も推奨していた。
リリエンソールのこの本は、単なる「原子力」の書ではない。「科学技術と社会の関わり」についての、体験に基づく深い洞察の記録である。二一世紀にこそ読み継がれるべき書と思う。ここでは核エネルギー関係を中心に少し紹介したい。
主な狙いは「人間の価値と国家的および国際的な政治制度に対して、核エネルギーがどう関与するか」を明らかにすることだと言い、「エネルギー危機」の真の意味は「人類の運命が、人類自身の想像力と好奇心がもたらした結果によって危うくなっている」ことだと指摘する。そして「最近は科学者の現実的分別と持久力に疑いをもつようになった。科学界の大部分がやる気をな

くしている」「この書の目的のひとつは、『科学が本来もっていた積極的で確信に満ちた闘志の復活を激励すること』である」と述べている。

一九六〇年代初めに軽水原発への早急過ぎる投資が混乱を呼んだが、これには「現状から後戻りして、人間の健康そして世界の平和と存続をおびやかさない道を見出す必要がある」「いずれ新しいおそらくは若い世代の情熱をもった科学者が現れるであろう。――五年、十年、もしくは一世代におよぶ時間が必要であろうとも」と言う。我々は「もっと安全でもっと複雑でない核エネルギーシステムを、開発途上国などのために、そして我々自身のために、開発する義務をまさに負っている」のである。彼は提言する、「新しいよりよい道を探し、再出発しよう」と。

そして、再出発の際の警告として彼はこうも言う、「核エネルギーについての最終的決定は科学者が下すのではなく、我々の社会のあらゆる主要な社会問題を決定する立場にある人々によってなされなければならない」と。

社会全員の命運すべてが関わるからであり、全く同感である。科学者もまた市民である。

今こそ復刊して、広く読んでいただきたいものである。

あとがき

終わりに、最も大切な先輩西堀榮三郎先生（一九〇三～八九年）が書かれた『技士道 十五ヶ条 ものづくりを極める術（すべ）』（朝日文庫、二〇〇八年。『創造力』（講談社刊、一九九〇年）を改題・再編集したもの）を推薦させていただきたい。先生は戦後日本の再興のため、「品質管理技術」向上にも大きな貢献をなさり、多数のご著書、選集を残されているが、この本は実に適切に「西堀哲学」を若者用に説いた名著で、最も読みやすいと思う。「科学技術とは何か」「人類のためにいかに生きるべきか」の基本を見事に教え諭してくださっている。

先生の大学講座後輩である私は、日本原子力研究所入所以来、多大のお世話になった。あの剛毅な先生も一時、体質に呆れて原子力界を去られたが、やがて戻ってくださり、晩年は我々の「トリウム熔融塩炉」を社会に生かそうと、命を縮めるほどの尽力をしてくださった。

以下に、西堀「技士道」の十五ヶ条を記す（朝日文庫版、二二、二三ページより）。

一　技術に携わる者は、「大自然」の法則に背いては何もできないことを認識する。

二　技術に携わる者は、感謝して自然の恵みを受ける。

三　技術に携わる者は、人倫に背く目的には毅然とした態度で臨み、いかなることがあっても屈してはならない。
四　技術に携わる者は、「良心」の養育に努める。
五　技術に携わる者は、常に顧客志向であらねばならない。
六　技術に携わる者は、常に注意深く、微かな異変、差異をも見逃さない。
七　技術に携わる者は、創造性、とくに独創性を尊び、科学・技術の全分野に注目する。
八　技術に携わる者は、論理的、唯物論的になりやすい傾向を戒め、精神的向上に励む。
九　技術に携わる者は、「仁」の精神で他の技術に携わる者を尊重し、相互援助する。
十　技術に携わる者は、強い「仕事愛」をもって、骨身を惜しまず、取り越し苦労をせず、困難を克服することを喜びとする。
十一　技術に携わる者は、責任転嫁を許さない。
十二　技術に携わる者は、企業の発展において技術がいかに大切であるかを認識し、経済への影響を考える。
十三　技術に携わる者は、失敗を恐れず、常に楽観的見地で未来を考える。
十四　技術に携わる者は、技術の結果が未来社会や子々孫々にいかに影響を及ぼすか、公害、安全、資源などから洞察、予見する。
十五　技術に携わる者は、勇気をもち、常に新しい技術の開発に精進する。

現在まで実用化されてきた原発は、核分裂エネルギー技術の本性を捉えたものではなかった。だから次第に衰退したのである。本書では、ウィグナーが第二次世界大戦中に明らかにしてくれていたように、「原発には、現在のものとは全く別の新しい考え方がある」ことを示し、それが今世紀世界に早急に具体化でき、地球問題の解決に役立てうることを明らかにした。
しかし、新しい技術構想は数年では育たない。長い歴史を背負い、複雑な経緯の中から育つものである。私個人としてもたっぷり五〇年の歴史がある。これを育んだ膨大な努力が先輩・同輩・後輩たちにより払われた。米国・ロシア・カナダ・フランス・インド・チェコ・トルコ・ベラルーシ・ベネズエラ・日本等にわたる、「三国志」以上の魅力ある人間ドラマである。
仕事を発展できたのは、多くの優れた師を、同志を得たからである。科学は「共同して努力する」ものだから、ひとりでは何もできない。故西堀榮三郎先生のほか、直接の恩師としては、学問について最も感銘を受けた故佐々木申二先生、学問と人間の共存共栄を悟らせてくださった故高木秀夫先生、液体研究を指導してくださった故竹内栄先生と故ジョン・デスモンド・バナール教授、トリウム熔融塩炉を育てた故アーヴィン・ワインバーグ博士以下のオークリッジ国立研究所の人々、また、我々のトリウム研究を世界につなげてくださった故亀井貫一郎先生、そして、社会に拡げるべく努力してくださった故茅誠司・故伏見康治・故武田栄一・故斎藤信房・石谷清幹の諸先生の名を、少なくとも挙げなければならない。その他、国内外数十人にわたる多くの先

輩後輩の研究協力を記したいが、紙数の都合で果たせないのは残念である。ただ、故塚田甲子男・中原康明・加藤義夫・三田地紘史の諸氏の名だけは掲げさせていただきたい。

本書をまとめるに当たっても、直接に加藤義夫・杉暉夫（故人）・宇野誠治・橋爪秀幸氏その他多くの方々に多大のご助言を頂戴した。また、編集部の嶋津弘章氏には、とかく理屈っぽくなる悪文を徹底的に改めていただいた。心から感謝の意を表させていただきたい。

二〇一一年四月

古川和男

主要参考文献リストと解題

A基本文献（啓蒙的）

古川和男：「トリウム・エネルギー」、『エネルギー・資源ハンドブック』（エネルギー・資源学会編）P654～659、オーム社（一九九六）《要約的》

古川：誌上講座「トリウム炉」六回連続、『エネルギー』（2005‐11より）日本工業新聞社

古川：「21世紀の核エネルギーを考える――トリウム導入とその終焉」、『原子力eye』誌上に44巻（一九九八）九月号より四回掲載、16pp《最新の構想を含めて総合解説》

古川、加藤：「理想的な核エネルギー利用体系を求めて――トリウム熔融塩核エネルギー協働システム」、『日本物理学会誌』57（7）P467～475（二〇〇二）《最新で包括的、理系学生対象》

古川：「新しい核エネルギーと来世紀環境対策について――トリウム溶融塩核エネルギー協働システム」、『エネルギー・資源』17（4）P332～338（一九九六）《一般科学技術者向き》

古川：「エネルギー技術革新を求めて50年――核拡散のない液体燃料トリウム熔融塩炉」、『東海大学紀要 工学部』49（2）P1～10（二〇〇九）《より最新で包括的、理工系学生対象》

古川：「温故知新：トリウム溶融塩協働システムへの道」、『日本原子力学会誌』38（2）P115～119（一九九六）《核エネルギー関連を中心の略歴。液体Na技術開発を含む》

日本原子力学会編：『ミクロ科学とエネルギー』コロナ社（一九九九）《核エネルギー啓蒙書》

古川：「核拡散防止への実効ある提言」（第二二回佐藤栄作賞最優秀賞受賞論文、佐藤栄作［ノーベル平和賞］記念国連大学協賛財団）

B基本文献（中・高級）

古川：「来世紀の核エネルギーシステム」、『原子力工業』誌上に37巻（一九九一）七月号より一二回掲載、110pp《エネルギー論・資源論を含め詳細に講義》

『溶融塩増殖炉』（改訂増補版）321pp、日本原子力学会（一九八一）《ＯＲＮＬの成果を中心に詳細に解説した教科書》

『スポレーション中性子工学』234pp、日本原子力学会（一九八四）《工学の全貌を総合解説。加速器熔融塩増殖炉を含む》

M. W. Rosenthal, P. N. Haubenreich, R. B. Briggs:"The Develop.Status of Molten-Salt Breeder Reactors",ORNL-4812, 416pp（1972）《ＯＲＮＬの熔融塩炉技術総合解説》

IAEA-TECDOC-1536:"Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling"［FUJI concept（p.821-856）］（2007.1）《小型炉調査報告書の中で、ＦＵＪＩ解説》

K. Furukawa, A. Lecocq, Y. Kato & K. Mitachi:"Summary Rep.:Thorium Molten-Salt Nuclear Ene.Synergetics",J.Nucl.Sci.Tech.,27, No. 12, p.1157-1178（1990）《初期の基本総合報告》

K.Furukawa,H.Numata,Y.Kato,K.Mitachi,R.Yoshioka,A.Furuhashi,Y.Sato,K.Arakawa:"New

Primary Energy Source by Thorium Molten-Salt Reactor Technology", Electrochemistry, 73, No.8, p.552-563（2005）《熔融塩技術主体の総合報告書》

古川、荒河一渡、L.Berrin Erbay（トルコ）、伊藤靖彦、加藤義夫、Hanna Kiyavitskaya（ベラルーシ）、Alfred Lecocq（仏）、三田地紘史、Ralph Moir（米）、沼田博雄、J. Paul Pleasant（米）、佐藤譲、島津洋一郎、Vadim A.Simonenco（露）、Din Dayal Sood（印）、Carlos Urban（ブラジル）、吉岡律夫、17名（海外8名）共著："A Road Map for the Realization of Global-scale Thorium Breeding Fuel Cycle by Single Molten-Fluoride Flow", Energy Conversion & Management, 49, No. 7, p.1832-1848（2008）《最新で最も包括的報告書》

C 補助文献

『溶融塩・熱技術の基礎』（溶融塩・熱技術研究会編著）315pp、アグネ技術センター（一九九三）《溶融塩とは何か、その工学的特色から技術応用例まで、研究会の総力を挙げて解説した第二版。第一版は一九七九年、英訳版は一九八〇年刊》

古川：「液体（核）燃料」、『原子炉工学講座 第4巻』P77～113、培風館（一九七一）《総合解説。世界的に最新》

古川、大野：『無機融体の物性値（1）LiF-BeF_2系溶融塩（Flibe）』日本原子力情報センター（一九八〇）［（2）Li_2BeF_4、アルカリ硼フッ化物、日本原子力研究所（一九七二）］

ハームズ、ハインドラー共著：『核エネルギー協働システム概論』202pp、古川監訳、培風館（一九八六）《核エネルギーシステムを総合評価し、協働システム（synergetics）の必要性・基本性格を論じた唯一の教科書》〔A.A.Harms & M.Heindler:"Nuclear Energy Synergetics", Plenum Press (1982)〕

古川：「液体ナトリウム技術」、『原子炉工学講座 第5巻』P89～148、培風館（一九七一）

D関連文献

Alvin M.Weinberg:"The First Nuclear ERA:The Life & Times of a Technological Fixer", Amer. Inst.Physics, New York (1994)《ワインバーグ博士の自伝的解説》

David E. Lilienthal:"Atomic Energy: A New Start", Harper & Row Pub.,124pp (1980)、訳書：リリエンソール著：『岐路にたつ原子力』（古川訳）、日本生産性本部（一九八一）

A. Brown:"J.D. Bernal: The Sage of Science", Oxford Univ. Press, 562pp (2005)《伝記》

J.D. Bernal:"World without War", Routledge & Kegan Paul Ltd.,London (1958)、訳書：J・D・バナール著：『戦争のない世界』上、下（鎮目恭夫訳）岩波書店（一九五九）

西堀榮三郎：『技士道 十五ヶ条　ものづくりを極める術（すべ）』朝日文庫（二〇〇八）

その他『トリウム熔融塩核エネルギー協働システム構想に関する論説・資料集』

“トリウム熔融塩炉（MSR）”研究開発略年表

年代	**主な出来事（【　】は特記事項）**
2007.6	古川、第13回ICENES国際会議で冒頭講演（於Istanbul,Turkey）。論文“A Road Map for the Realiz. of Global-scale Th Breeding Fuel Cycle”は“Ene.Conv.&Manag.”〔49, No.7, p.1832-1848（2008）〕に掲載さる【国内外同志17名連名の論文】
2008.10	**NPO《トリウム熔融塩国際フォーラム》ITHMSF**、正式法人登録。2009年１月発会式
2009.4	古川、Adv.Nucl.Fuel Manag.Conf.IV（米）の新設トリウム・セッションで講演。また、ベネズエラから招待を受け、訪問講演
2009.6	古川、プラハとモスクワを訪問、miniFUJIとFUJIの開発ビジネス討議
2010.3	トリウム会議（熔融塩炉中心のもの。於Th. Energy All.Conf.,Google本部, CA, USA）に参加。今後の日本開催提案
2010.6	**株式会社インターナショナル・トリウム・エナジー＆熔融塩テクノロジー（略称アイテムスＩＴｈＥＭＳ）設立**
2010.9	IThEMS役員４名、チェコを訪問し事業共同に合意
2010.10	トリウム国際会議“ThEC 2010,London”参加と、米諸企業およびORNL訪問
2011.3	**株式会社トリウムテックソリューション（略称ＴＴＳ）への改組と発足**
2011.4	チェコを訪問、miniFUJI共同開発事業開始

⇨246頁より続く

年代	主な出来事（【　】は特記事項）
1995.6	ロシア技術物理研ITP（核弾頭開発研Inst.Tech.Phys.,Snezhinsk、所長アブローニン）が、miniFUJI共同開発を提案
1997.4	**国際熔融塩炉専門家会議開催**（RAND-HQ,CA, USA）。8カ国およびIAEAより24名参加、miniFUJI計画支持
1997.7	日米露三国共同開発計画に合意（於ITP, Snezhinsk）。ITP所内にminiFUJI敷地内定（シベリア西端、ウラル東麓）。露政府承諾
1997.8	米クリントン大統領科学技術補佐官ジョン・ギボンズに面会、日米露三国共同開発に理解を示し、共同開発に問題なしと支持表明を受ける
2001.8	『「原発」革命』出版（文春新書、2008年第2刷）【英訳あり】
2004.9	チェコSKODA社、NRIなどとの技術協力を強化
2005.9	米ローレンス・リバモア国立研のR・モイヤーとエドワード・テラー（核科学最高指導者）が**FUJI支持の論文公表**【直後にテラー死去】
2006.6	古川、第22回佐藤栄作賞（佐藤栄作［ノーベル平和賞］記念国連大学協賛財団主宰）**「核拡散防止」論文最優秀賞受賞**
2006.9	古川、チェコ原発会社SKODA - JS（President M.Fiala）開業50周年記念会に招待さる
2007.1	IAEAより中小規模原発開発の最終報告書（IAEA - TECDOC - 1536,p.821 - 856）**【THORIMS - NESの現況・開発計画を含む】**

前ページへ続く⇨

"トリウム熔融塩炉（MSR）"
研究開発略年表
（2011年4月まで）

年代	**主な出来事（【　】は特記事項）**
1947〜76	米ORNL（オークリッジ国立研）、**MSR-program**実施。熔融塩増殖炉MSBR構想を研究開発
1965〜69	ORNL、**熔融塩実験炉MSRE**の運転実験に成功【2.6万時間運転、無事故】
1980.10	**古川ら、加速器熔融塩増殖炉AMSBを発明**【米MSBR構想の矛盾を解消】
1981.7	トリウム・エネルギー学術委員会発足（会長:茅誠司、副会長:伏見、西堀、武田、斎藤他）。自民党トリウム利用推進議員懇話会発足（会長:二階堂進、会員108名）
1983.6	ソ連クルチャトフ研アレクサンドロフ所長（科学アカデミー総裁）、MSR共同開発を古川に提案【事情不詳で留保。後に計画確認】
1985.8	**古川ら、FUJI（燃料自給自足型小型原発）-単純小型密閉式熔融塩炉を発明**【黒鉛不交換、連続化学処理装置不要】
1987.11	フランス電力庁、高速増殖炉スーパーフェニックス2号機は不建設と決定。総裁、「造ればフランス経済が破産」と、古川を構想検討に招待
1988.11	米ORNLトライベルピース所長、古川にソ連クルチャトフ研との三者共同開発を提案
1991.7	ソ連理論実験物理研ITEP、古川とAMSBの共同研究開始。ベラルーシ・ソスニー科学センターも協力
1992.6	米ブッシュ大統領科学技術補佐官アラン・ブロムリーに面会、**THORIMS - NES構想**を激励さる

前ページへ続く⇨

本書は文春新書『「原発」革命』
（二〇〇一年八月刊）の増補新版である。

古川和男（ふるかわ　かずお）
1927年、大分県生まれ。京都大学理学部卒。東北大学金属材料研究所助教授、日本原子力研究所主任研究員、東海大学開発技術研究所教授を経て、現在NPOトリウム熔融塩国際フォーラム理事長、株式会社トリウムテックソリューション社長。「無機液体構造化学」及び「液体金属・熔融塩工学とその核エネルギーシステムへの応用」を手がけ、「トリウム利用構想」を日・米・仏・露・ベラルーシ・チェコ等の協力を得てまとめてきた。

文春新書

806

原発安全革命（げんぱつあんぜんかくめい）

2011年（平成23年）5月20日　第1刷発行

著　者　古川和男
発行者　飯窪成幸
発行所　株式会社　文藝春秋

〒102-8008　東京都千代田区紀尾井町3-23
電話（03）3265-1211（代表）

印刷所　大日本印刷
付物印刷　大日本印刷
製本所　大口製本

定価はカバーに表示してあります。
万一、落丁・乱丁の場合は小社製作部宛お送り下さい。
送料小社負担でお取替え致します。

ISBN978-4-16-660806-5

◆日本の歴史

日本神話の英雄たち　林 道義
日本神話の女神たち　林 道義
ユングでわかる日本神話　林 道義
古墳とヤマト政権　白石太一郎
一万年の天皇　上田 篤
謎の大王 継体天皇　水谷千秋
謎の豪族 蘇我氏　水谷千秋
謎の渡来人 秦氏　水谷千秋
女帝と譲位の古代史　水谷千秋
孝明天皇と「一会桑」　家近良樹
四代の天皇と女性たち　小田部雄次
対論 昭和天皇　原 武史・保阪正康
昭和天皇の履歴書　文春新書編集部編
昭和天皇と美智子妃 その危機に　加藤恭子・田島恭二監修
皇族と帝国陸海軍　浅見雅男
平成の天皇と皇室　高橋 紘

皇位継承　高橋 紘・所 功
美智子皇后と雅子妃　福田和也
ミッチー・ブーム　石田あゆう
天皇はなぜ万世一系なのか　本郷和人
皇太子と雅子妃の運命　文藝春秋編
戦国武将の遺言状　小澤富夫
江戸の都市計画　童門冬二
江戸のお白州　山本博文
徳川将軍家の結婚　山本博文
江戸城・大奥の秘密　安藤優一郎
幕末下級武士のリストラ戦記　安藤優一郎
旗本夫人が見た江戸のたそがれ　深沢秋男
徳川家が見た幕末維新　徳川宗英
伊勢詣と江戸の旅　金森敦子
甦る海上の道・日本と琉球　谷川健一
合戦の日本地図　武光 誠・合戦研究会
大名の日本地図　中嶋繁雄
名城の日本地図　西ヶ谷恭弘・日井貞夫

県民性の日本地図　武光 誠
宗教の日本地図　武光 誠
高杉晋作　一坂太郎
白虎隊　中村彰彦
新選組紀行　中村彰彦・神長文夫
岩倉使節団という冒険　泉 三郎
福沢諭吉の真実　平山 洋
元老 西園寺公望　伊藤之雄
山県有朋 愚直な権力者の生涯　伊藤之雄
渋沢家三代　佐野眞一
明治のサムライ　太田尚樹
日露戦争 勝利のあとの誤算　黒岩比佐子
鎮魂 吉田満とその時代　粕谷一希
旧制高校物語　秦 郁彦
日本を滅ぼした国防方針　黒野 耐
ハル・ノートを書いた男　須藤眞志
日本のいちばん長い夏　半藤一利編
昭和陸海軍の失敗　半藤一利・秦郁彦・平間洋一・保阪正康・黒野耐・戸高一成・戸部良一・福田和也

あの戦争になぜ負けたのか　半藤一利・保阪正康・中西輝政・戸髙一成・福田和也・加藤陽子
二十世紀日本の戦争　阿川弘之・猪瀬直樹・中西輝政・秦　郁彦・福田和也
零戦と戦艦大和　半藤一利・秦　郁彦・前間孝則・鎌田伸一・戸髙一成・江畑謙介・兵頭二十八・福田和也・清水政彦
十七歳の硫黄島　秋草鶴次
指揮官の決断　満州とアッツの将軍　樋口季一郎　早坂　隆
硫黄島　栗林中将の最期　梯久美子
特攻とは何か　森　史朗
銀時計の特攻　江森敬治
帝国陸軍の栄光と転落　別宮暖朗
帝国海軍の勝利と滅亡　別宮暖朗
日本兵捕虜は何をしゃべったか　山本武利
幻の終戦工作　竹内修司
東京裁判を正しく読む　牛村　圭・日暮吉延
昭和史の論点　坂本多加雄・秦　郁彦・半藤一利・保阪正康
昭和の名将と愚将　半藤一利・保阪正康
昭和史入門　保阪正康
対談　昭和史発掘　松本清張
昭和十二年の「週刊文春」　菊池信平編

昭和二十年の「文藝春秋」　文春新書編集部編
「昭和80年」戦後の読み方　中曾根康弘・西部邁・松井孝典・松本健一
誰も「戦後」を覚えていない　鴨下信一
誰も「戦後」を覚えていない［昭和20年代後半篇］　鴨下信一
誰も「戦後」を覚えていない［昭和30年代篇］　鴨下信一
ユリ・ゲラーがやってきた　鴨下信一
戦後10年　東京の下町　京須偕充
評伝　若泉敬――愛国の密使　森田吉彦
米軍再編と在日米軍　森本　敏
同時代も歴史である　一九七九年問題　坪内祐三
プレイバック1980年代　村田晃嗣
シェーの時代　泉　麻人
昭和の遺書　梯久美子
父が子に教える昭和史　福田和也ほか
歴史人口学で見た日本　速水　融
コメを選んだ日本の歴史　原田信男
閨閥の日本史　中嶋繁雄
名前の日本史　紀田順一郎

名字と日本人　武光　誠
日本の童貞　渋谷知美
日本の偽書　藤原　明
明治・大正・昭和　30の「真実」　三代史研究会
明治・大正・昭和史　話のたね100　三代史研究会
真説の日本史　365日事典　楠木誠一郎
日本文明77の鍵　梅棹忠夫編著
「悪所」の民俗誌　沖浦和光
旅芸人のいた風景　沖浦和光
貧民の帝都　塩見鮮一郎
史実を歩く　吉村　昭
手紙のなかの日本人　半藤一利
平成人（フラット・アダルト）　酒井　信
「阿修羅像」の真実　長部日出雄

◆経済と企業

マネー敗戦　吉川元忠
新・マネー敗戦　岩本沙弓
強欲資本主義 ウォール街の自爆　神谷秀樹
ゴールドマン・サックス研究 世界経済崩壊の真相　神谷秀樹
黒字亡国 対米黒字が日本経済を殺す　三國陽夫
ヘッジファンド　浜田和幸
石油の支配者　浜田和幸
金融工学、こんなに面白い　野口悠紀雄
金融商品取引法　渡辺喜美
定年後の8万時間に挑む　加藤　仁
人生後半戦のポートフォリオ　水木　楊
知的財産会計　二村隆章 岸　宣仁
霞が関埋蔵金男が明かす「お国の経済」　髙橋洋一
臆病者のための株入門　橘　玲
人生と投資のパズル　角田康夫
企業危機管理 実戦論　田中辰巳

企業再生とM&Aのすべて　藤原総一郎
企業コンプライアンス　後藤啓二
敵対的買収を生き抜く　津田倫男
ハイブリッド　木野龍逸
日本企業モラルハザード史　有森　隆
ちょいデキ！　青野慶久
熱湯経営　樋口武男
先の先を読め　樋口武男
オンリーワンは創意である　町田勝彦
「強い会社」を作る ホンダ連邦共和国の秘密　赤井邦彦
明日のリーダーのために　葛西敬之
インド IT革命の驚異　榊原英資
中国経済 真の実力　森谷正規
「俺様国家」中国の大経済　山本一郎

*

ネットバブル　有森　隆
エコノミストは信用できるか　東谷　暁
エコノミストを格付けする　東谷　暁

生命保険のカラクリ　岩瀬大輔
高度経済成長は復活できる　増田悦佐
日本経済の勝ち方 太陽エネルギー革命　村沢義久
デフレはなぜ怖いのか　原田　泰
団塊格差　三浦　展
ポスト消費社会のゆくえ　辻井　喬 上野千鶴子
いつでもクビ切り社会　森戸英幸
自分をデフレ化しない方法　勝間和代
JAL崩壊　日本航空・グループ2010
ユニクロ型デフレと国家破産　浜　矩子
もし顔を見るのも嫌な人間が上司になったら　江上　剛
就活って何だ　森　健
ぼくらの就活戦記 難関企業内定者40人の証言　森　健
出版大崩壊 電子書籍の罠　山田　順

◆社会と暮らし

同級生交歓　文藝春秋編
ウェルカム・人口減少社会　藤正 巖　古川俊之
「信用偏差値」あなたを格付けする　岩田昭男
この国が忘れていた正義　中嶋博行
少年犯罪実名報道　髙山文彦編著
アベンジャー型犯罪　岡田尊司
週刊誌風雲録　高橋呉郎
リサイクル幻想　武田邦彦
裁判所が道徳を破壊する　井上 薫
私が見た21の死刑判決　青沼陽一郎
闘う楽しむマンション管理　水澤 潤
「老いじたく」成年後見制度と遺言　中山二基子
年金無血革命　永富邦雄
日本男児　赤瀬川原平
ヒトはなぜペットを食べないか　山内 昶
犬と話をつけるには　多和田 悟

猫の品格　青木るえか
伝書鳩　黒岩比佐子
ゼロ円で愉しむ極上の京都　入江敦彦
世界130カ国自転車旅行　中西大輔
旅する前の「世界遺産」　佐滝剛弘
日本全国 見物できる古代遺跡100　文藝春秋編
戦争遺産探訪 日本編　竹内正浩
地図もウソをつく　竹内正浩
日本の珍地名　竹内正浩
囲碁心理の謎を解く　林 道義
ラブホテル進化論　金 益見
非モテ！　三浦 展
山の社会学　菊地俊朗
北アルプス この百年　菊地俊朗
東京大地震は必ず起きる　片山恒雄
サンカの真実 三角寛の虚構　筒井 功
風呂と日本人　筒井 功
はじめての部落問題　角岡伸彦

民俗誌・女の一生　野本寛一
忘年会　園田英弘
日本刀　小笠原信夫
戦争を知らない人のための靖国問題　上坂冬子
これでは愛国心が持てない　上坂冬子
今は昔のこんなこと　佐藤愛子
地球温暖化後の社会　瀧澤美奈子
歌舞伎町・ヤバさの真相　溝口 敦
潜入ルポ ヤクザの修羅場　鈴木智彦
農民になりたい　川上康介
農協との「30年戦争」　岡本重明

(2011. 3) C

◆こころと健康・医学

文春新書好評既刊

片山恒雄
東京大地震は必ず起きる
政府や企業の危機管理体制を含めて事前・事後のあらゆる対応を明示した防災教科書。出火や延焼などでとくに危険な区域はどこか？
280

瀧澤美奈子
地球温暖化後の社会
マイバッグ、マイ箸のエコ度は悲しいほど低い。至近距離のエコだけではなく、温暖化を「第3次産業革命」ととらえて乗り越えよう
683

福田和也
大丈夫な日本
米中の二大国に翻弄され、人口減少にも悩むこの国に未来はあるか。日本という国家が再建し、発展していくためのグランドデザイン
500

塩野七生
日本人へ　リーダー篇
ローマ帝国は危機に陥るたびに挽回した。では、今のこの国になにが一番必要なのか。「文藝春秋」の看板連載がついに新書化なる
752

塩野七生
日本人へ　国家と歴史篇
ローマの皇帝たちで作る「最強内閣」とは？とらわれない思考と豊かな歴史観に裏打ちされた日本人へのメッセージ、好評第2弾
756

文藝春秋刊

古川和男（ふるかわ　かずお）

1927年、大分県生まれ。京都大学理学部卒。東北大学金属材料研究所助教授、日本原子力研究所主任研究員、東海大学開発技術研究所教授を経て、現在NPOトリウム熔融塩国際フォーラム理事長、株式会社トリウムテックソリューション社長。「無機液体構造化学」及び「液体金属・熔融塩工学とその核エネルギーシステムへの応用」を手がけ、「トリウム利用構想」を日・米・仏・露・ベラルーシ・チェコ等の協力を得てまとめてきた。

古川和男
文春新書
806
¥800
『「原発」革命』緊急増補新版
全く発想の違う
「液体」「トリウム」「小型」
この原発なら
福島もチェルノブイリ
も起きなかった!
文藝春秋
定価(本体800円+税)
今月の新刊
原発安全革命　古川和男
山で失敗しない10の鉄則　岩崎元郎
昭和の藝人　千夜一夜　矢野誠一
列島強靭化論　日本復活5カ年計画　藤井　聡

これまでの原発は原理的に間違っていた！

福島の事故以来、原発を不安視する声は急速に高まっている。とはいえ、すぐに原発をやめるわけにはいかない。現代社会にエネルギーは不可欠だからだ。これ以上石油や石炭を燃やして二酸化炭素の排出を増やすわけにはいかないし、かといって、今の技術レベルの太陽光や風力発電では、とても原発に代替できない。

しかし、このジレンマは解決できる、と著者は言う。福島やチェルノブイリで起きたような事故を、原理的に起こさない原発がある、というのだ。その原理の要点は、燃料形態を固体から液体に代え、燃料をウランからトリウムに代え、炉を小型化するということ。このトリウム熔融塩炉は発電効率も極めて高く、プルトニウムの消滅にも一役買え、今、世界のエネルギー関係者の大いなる注目を集めている。

原発安全革命